

Vochtregulatie en verdamping

Wat kunnen we bereiken?

Cecilia Stanghellini



landbouw, natuur en
voedselkwaliteit



Rapport 274



Vochtregulatie en verdamping

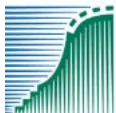
Wat kunnen we bereiken?

Cecilia Stanghellini

© 2009 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw

Exemplaren van dit rapport kunnen bij de (eerste) auteur worden besteld. Bij toezending wordt een factuur toegevoegd; de kosten (incl. verzend- en administratiekosten) bedragen € 50 per exemplaar.



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**



PT projectnummer 13235

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Samenvatting	1
Introductie	3
1 Het experiment	5
2 Resultaten	7
2.1 Waterverbruik en productie	7
2.2 Energieverbruik	7
2.3 De klimaatsetpoints	8
3 Verdamping sturen, hoe?	13
3.1 Welke factoren?	13
3.2 Vertaling in formules	17
3.3 Hoe groot is het effect van elke stuurfactor?	20
4 Een simpel model voor vochtsturing	23
4.1 Discussie	25
4.2 Nabeschuwing	28
5 Conclusie	29
6 Literatuur	31
7 Kennisoverdracht	33
Bijlage I Verdamping en dauwpunt	1 p.
Bijlage II Hand-outs en reprints van alle presentaties en artikelen	30 pp.

Samenvatting

Bij een van de voorgangers van Wageningen UR Glastuinbouw werd een reeks experimenten uitgevoerd waarbij een 'verdampingsregeling' was ontworpen die, met succes, de verdamping van een tomaatgewas terug kon brengen tot 65% van de verdamping in een referentiekas. Stuurfactoren waren de ventilatie, de verwarming en hogedruk bevochtiging. In geen enkele van de 8 experimenten is een lagere productie gemeten dan in de referentieafdeling. Aangezien het potentieel voor energiebesparing van sturing op een lagere verdamping dan het gangbare, en de behoefte aan nieuwe richtlijnen voor de sturing van bevochtiging in semigesloten teelten groot is, is de toen ontworpen regeling onder de loep genomen. Doelstelling was om uit het toenmalige onderzoek gereedschap, niet bedoeld voor implementatie in praktijkregelingen, een aantal simpele 'regels' te distilleren die wel implementeerbaar zijn in de huidige klimaatregelaars.

De eerste pogingen om reproduceerbaar statistische trends te vinden in de data zijn teleurstellend geweest.

Uiteindelijk is, door een goede analyse van het verdampingsproces, het dauwpunt naar voren gekomen als veelbelovende vochtigheidsparameter. Deze analyse heeft het mogelijk gemaakt om een model te ontwikkelen waaraan het verschil tussen luchttemperatuur en dauwpunt (dauwpuntdepressie) moet voldoen om de gewenste verlaging van de gewasverdamping waar te maken.

Heranalyse van de data-set (het dauwpunt was toen niet gebruikt noch berekend) heeft aangetoond dat de toen berekende setpoints van luchttemperatuur en vochtdeficiet inderdaad voldeden aan het nu ontworpen model voor de dauwpuntdepressie.

Door rekening te houden met de zonnestraling en gewasomvang, en flexibel te zijn m.b.t. luchttemperatuur, lijkt dit model tegemoet te komen aan de wensen voor een moderne vochtsturing. Door zijn eenvoud kan het model makkelijk geïmplementeerd worden in de huidige regelingen.

De belangrijkste conclusies uit dit project zijn:

1. Hoewel alle vochtparameters verwisselbaar zijn, maakt het dauwpunt de zaken wel overzichtelijker
2. Sturen op een minimale verdamping komt overeen met het sturen op een minimale afstand tussen gewas temperatuur en dauwpunt
3. Een simpele formule is voorgesteld voor vochtsturing. Deze is gebaseerd op het sturen van de dauwpuntdepressie (verschil tussen luchttemperatuur en dauwpunt)
4. Sturing op dauwpuntdepressie is flexibel door de twee stuurknoppen: luchttemperatuur en dauwpunt (vochtigheid). Dit maakt het mogelijk steeds de meest energiezuinige oplossing te kiezen.
5. De resulterende 'vochtsetpoint' varieert met de omstandigheden, doordat de voorgestelde formule op een simpele wijze rekening houdt met klimaatfactoren (straling, temperatuur en luchtsnelheid) en gewasomvang.
6. Met deze ontwikkelde formule wordt een onderzoek mogelijk naar de fysiologische grenzen van gewasverdamping.

Introductie

Het is een dogma bij tuinders dat verdamping geregeld moet worden: bij 'te lage' verdamping worden 'stimulerende' maatregelen genomen ondanks de hoge energiekosten. De conclusie van alle desk-studies (b.v. Dueck, *et al.*, 2004) over dit onderwerp is, dat het toelaten van een kleine daling (bijvoorbeeld 5%) in de totale verdampingssom, een directe vermindering van het energieverbruik met 11 á 13% als gevolg zou kunnen hebben. In meerdere onderzoeken (al vanaf de eerste energiecrisis) is aangetoond dat minder verdamping niet ten koste hoeft te gaan van productie, zie literatuur lijst. In een tweetal 'vocht workshops' gehouden in het voorjaar 2007 waren de aanwezige experts unaniem van mening dat planten even goed kunnen functioneren met een veel beperktere (50%) verdamping.

Aan de andere kant, wordt in toenemende mate bevochtiging gebruikt om 'te hoge' verdamping tegen te gaan. Door technische ontwikkelingen als ontvochtiging via koeling en luchtbevochtiging is het mogelijk de luchtvochtigheid in de semigesloten teelten beter te sturen. De klimaatfactor luchtvochtigheid krijgt daardoor meer aandacht, ook al liggen er nog veel vragen over dit onderwerp. Echter, de huidige regeling van die kassen berust op empirische kennis vergaard onder een sterke onderlinge koppeling van klimaatfactoren (zoals temperatuur, vochtigheid en straling). Men is zich wel bewust dat door het toepassen van de 'traditionele paradigma's' in semigesloten teelten de gewasverdamping wellicht onnodig wordt opgejaagd, waarbij weer vocht wordt geproduceerd die op een (energetisch) kostbare wijze afgevoerd moet worden (b.v. Eveleens, *et al.*, 2009).

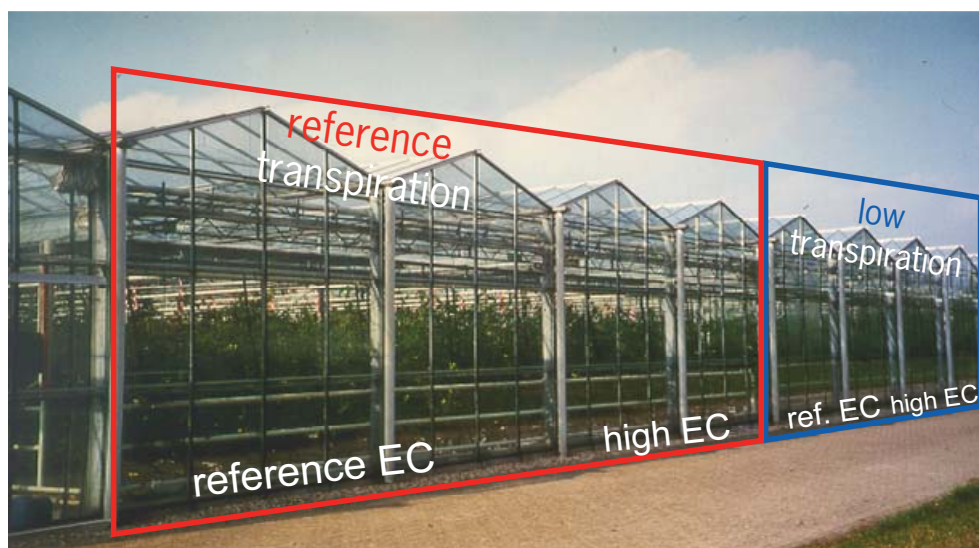
Een bijkomend aspect is dat luchtvochtigheid (RV dan wel dampdrukdeficit) zowel als indicator als stuurvariabele voor de verdamping wordt gebruikt. In hoeverre vochtigheid dienst kan doen als indicator en in hoeverre verdamping gestuurd kan worden door vochtregeling hangt heel sterk af van omstandigheden (dag/nacht; donker/zonnig; soort gewas, klein/groot gewas; winter/zomer) waarmee in geen enkele regeling rekening wordt gehouden. B.v. in de Synergie werkgroep, of in blogs op de site [energiek2020](http://energiek2020.nl), wordt steeds vaker door tuinders aangegeven dat de vochtregeling anders moet zijn onder verschillende klimaatomstandigheden.

In een reeks experimenten (1996-1998) werden twee kasafdelingen met succes geregeld (slechts door raamstand en hokedruk bevochtiging) om een constante verhouding, 65%, in de verdampingsnelheid tussen de twee afdelingen te handhaven, terwijl verschillende EC behandelingen werden toegepast. De gegevens werden toen geanalyseerd met het accent op de productie i.r.t. EC, waarbij de verlaagde verdamping een factor was. De tot nu toe unieke 'verdampingsregeling' die hiervoor werd ontwikkeld kan niet zonder meer toegepast worden in een praktijkkas, omdat de set-points on-line berekend werden door iteratieve toepassing van een model voor de gewasverdamping. Niettemin biedt de verzamelde dataset veel informatie over de stuurbaarheid van de verdamping. Deze informatie kan gebruikt worden voor het ontwikkelen van een simpelere regeling geschikt voor gangbare kassen. B.v.: ten aanzien van de vochtigheid die werd bereikt in de verlaagde verdampingsafdeling en in hoeverre (en in welke omstandigheden) bevochtiging een effectief middel is om de verdamping te limiteren.

Het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en de Productschap Tuinbouw hebben onder het programma 'Kas als Energiebron' dit project gefinancierd zodat een nieuwe analyse van de data set toen verzameld mogelijk gemaakt werd. Doelstelling was om, zomogelijk, een praktijkgerichte, energiezuinige 'verdampingsregeling' op te stellen, die verneveling aan kan en rekening houdt met verschillende omstandigheden in de kas, t.w. verschillende lichtcondities; stookbehoefte; gewasomstandigheden (klein/groot; goed/slecht verdampend) en kans op nat-slag. Daarbij was een oordeel/richtlijnen gewenst over de toepassingswaarde van de verschillende vochtparameters als indicatoren voor wateropname dan wel ziektedruk.

1 Het experiment

De experimenten werden uitgevoerd in twee identieke afdelingen (300 m² elk) van het kassencomplex van de toenmalige IMAG, te Wageningen. Het waren 4 tomatenteelten, *cv Chaser*, elke met 2 EC behandelingen, geteeld volgens de gangbare praktijk, op steenwol matten, plant dichtheid 2,2 m⁻². De afdelingen waren uitgerust met een standaard verwarming systeem, en natuurlijke ventilatie door afwisselend nok luchting. Een van de twee afdelingen (lage verdamping, LV) was uitgerust met een hoge druk fogging systeem, met een capaciteit van 0,17 l m⁻² h⁻¹. De proeven waren gezet als split-plots, de subplots (de helft van elk compartiment) met EC behandeling. Dus waren er steeds twee voedingsoplossingen, elk geleverd aan twee helften van een compartiment, zie Figuur 1. Een hoog drainpercentage en een periode van continue recirculatie 's nachts waren bedoeld om accumulatie van zouten in de matten te voorkomen, dat was inderdaad vermeden. Wat veranderde tussen de verschillende teelten was de hoge EC behandeling, omwille van de beperking om meer dan twee voedingsbehandelingen tegelijk te geven.



Figuur 1. De kas waar de experimenten werden uitgevoerd, met een weergave van de opstelling van de behandelingen.

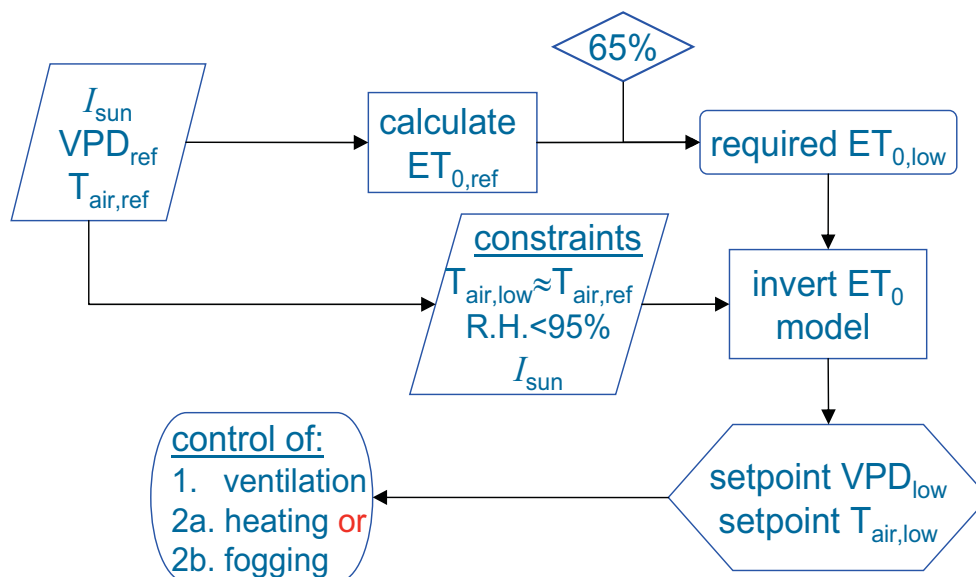
Doel van de proeven was het toetsen de hypothese dat een verlaagde verdampingsvraag het oogstverlies door hoge EC in het wortelmilieu zou kunnen verzachten. Daarom werden de gegevens toen geanalyseerd met het accent op de productie in relatie tot EC, waarbij de verlaagde verdamping een factor was. De hypothese werd bewezen en de resultaten werden gepubliceerd door: Li, *et al.*, 2001; Li & Stanghellini, 2001; Li, *et al.*, 2002 en Li, *et al.*, 2004.

De verdampingsregeling werd geïmplementeerd in het klimaatcontrole systeem, en werd uitgevoerd elke 120 s, 24 uur per dag, met de volgende procedure (schematisch weergegeven in Figuur 2):

1. De referentie gewasverdamping werd berekend via het model van Stanghellini (1987) als een functie van de momentane zonnestraling (of het gebrek daaraan, 's nachts), de luchtvochtigheid en -temperatuur in het referentie-compartiment (hoge verdamping, HV), en een geschatte BladOppervlakte Index (LAI). Zonnestraling beschikbaar voor het gewas werd geschat op basis van de gegevens van het weerstation, door middel van de gemeten gemiddelde lichtdoorlatendheid van het compartiment.
2. Hetzelfde model werd omgedraaid om de combinaties van vochtigheid en temperatuur te berekenen, die zouden een gewasverdamping waarborgen gelijk aan 65% van de referentie—onder dezelfde zonnestraling (of het ontbreken daarvan) en LAI (Stanghellini en Van Meurs, 1992).
3. Uit deze combinaties werd die uitkomst gekozen die de minste afwijking veroorzaakte bij de kasluchttemperatuur (t.o.v. de referentie), onder de voorwaarde dat de relatieve vochtigheid, RV, niet meer zou bedragen dan

95%. Het selectiecriteria was in het licht van het bekende effect van de temperatuur op de groei en ontwikkeling van gewassen, en van de beperking op RV gericht op vermijden van ziektes, die inderdaad niet voor zijn gekomen.

4. Een proportionele (P) controller probeerde ten eerste de gewenste vochtigheid te bereiken d.m.v. de controle van de luchting. Toen dit niet voldoende bleek, werd de benodigde actietijd van het fogging systeem berekend.
5. Indien nodig, werd het verwarming systeem gestuurd door een P-controller, net als in de referentie-afdeling.



Figuur 2. Schema van de verdampings-regeling. Input variabelen waren de zonne-straling, en temperatuur en vochtigheid in de referentiekas. Op basis daarvan werd de referentie gewasverdamping berekend d.m.v. het Stanghellini model. De gewenste verdamping in de andere afdeling was 65% ervan. De setpoints voor temperatuur en vochtigheid die dit verdampingsnivo konden waarborgen werden bepaald door inversie van het model, onder de randvoorwaarden omschreven in de tekst.

Om verschillen te voorkomen in potentiële assimilatie, werd de CO₂ concentratie in de LV-afdeling geregeld om gelijk te zijn aan de andere kas, die werd gecontroleerd tot 700 en 400 ppm, met respectievelijk gesloten en open ramen. De stand van alle actuators en alle klimaatgegevens werden geregistreerd door het klimaatcontrole systeem en om de twee minuten opgeslagen. De gewasverdamping werd op de volgende manieren gemeten:

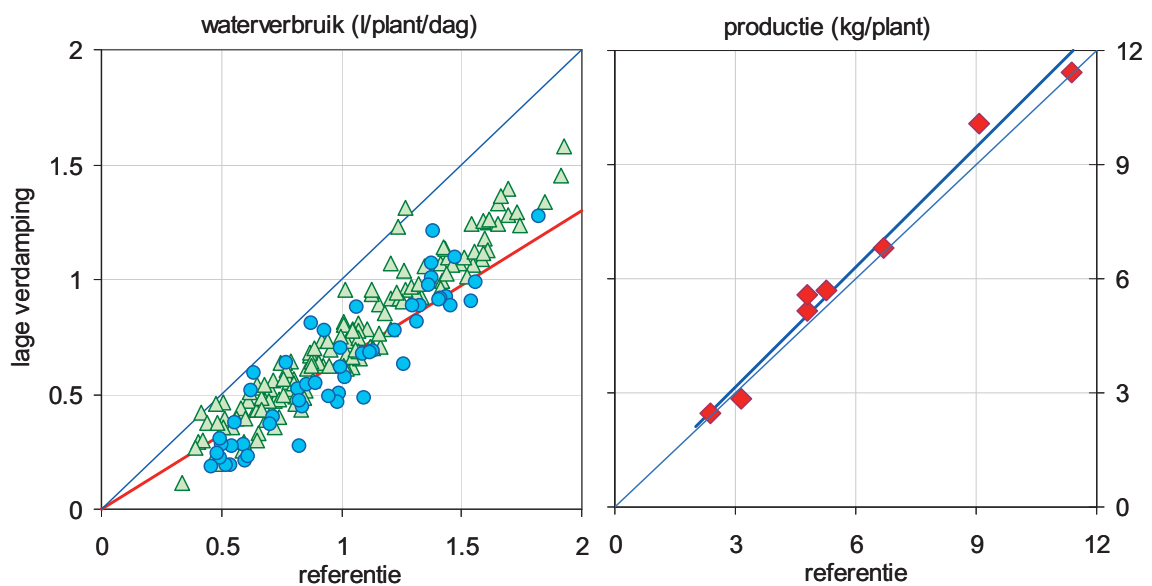
- 8 planten op goten, ondersteund door een frame, op elektronische weegschalen (60 kg volledige schaal, 0,1 g nominale nauwkeurigheid): één bij de referentie EC in de HV afdeling en één in elke EC behandeling in de lage verdampingsafdeling.
- Irrigatie naar elke subplot werd gemeten door middel van puls flowmeters met een nauwkeurigheid van 0,5 liter. Drain van alle subplots werd gescheiden gevangen in kleine opvangbakken waaruit, op sturing van drijvers, weer in de bijbehorende mengtank gepompt, via flow-meters van hetzelfde type.
- Voor extra controle, een drain gauge (tipping lepel) mat de drain flow, EC en PH van 8 planten in elke subplot.
- Bovendien werd het samengestelde waterverbruik van de twee gelijke EC behandelingen in de twee afdelingen gemeten door de bijvulling ook via flowmeters te laten lopen.

Achteraf gezien waren de kruiscontroles niet overbodig, omdat alle methodes nogal gevoelig waren voor storing. Het meten van het gewicht kon niet volledig worden vertrouwd terwijl de fogging aan stond en de periodes van continue recirculatie (en andere incidenten) lekkages veroorzaakten.

2 Resultaten

2.1 Waterverbruik en productie

Er werden voldoende geldige gegevens van waterverbruik en verdamping verzameld ter ondersteuning van de conclusie dat de verdampingsregeling functioneerde zoals te verwachten was (Figuur 3). Er was een trend van meer vers gewicht productie in de LV afdeling, Figuur 4, terwijl geen effect ooit was waargenomen op de droge stof productie of op de ontwikkeling van planten, Li, *et al.*, 2001.



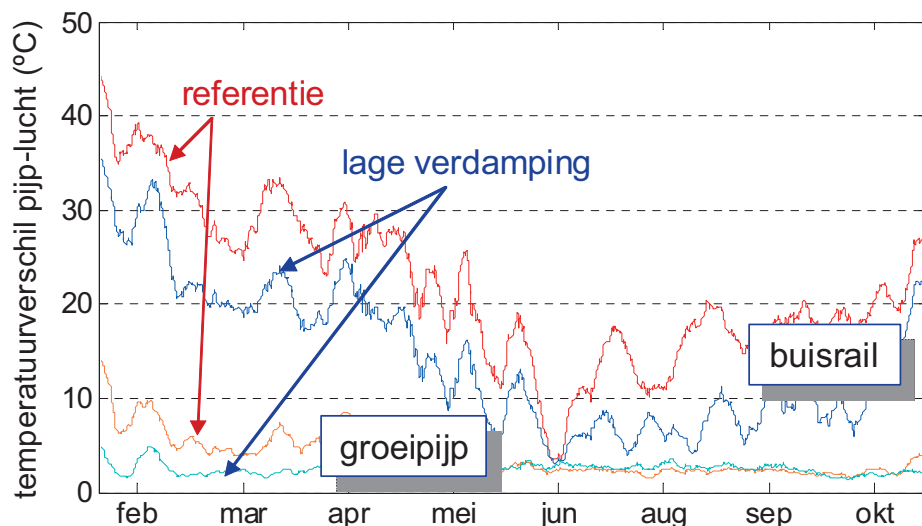
Figuur 3. Dagelijks waterverbruik (liters per plant) van twee experimenten, van de lage verdamping afdeling t.o.v. het verbruik van dezelfde EC-behandeling in de referentie afdelingen. Cirkels 2 en driehoekjes 9 dS/m. De rode lijn is de gewenste verhouding.

Figuur 4. Totale productie (kg per plant) van de lage verdamping afdeling t.o.v. de productie van dezelfde EC-behandeling in de referentie afdelingen. 4 experimenten, elke met 2 EC's. EC varieert van 2 tot 9 dS/m.

2.2 Energieverbruik

Energieverbruik van de lage verdamping afdeling was 73% van het energieverbruik van de referentie. Omdat het energieverbruik niet gemeten werd, is dit een schatting gebaseerd op het gemeten temperatuurverschil tussen de verwarmingselementen en de lucht. Aangezien de configuratie van de verwarming in de twee kassen identiek was (een 51 mm buisrail en een hijsbare 'groeipijp'), is het zeker aannemelijk dat de warmte overdrachtscoëfficiënt gelijk is. Daardoor is de energieafgifte van beide systemen op dezelfde wijze evenredig met het temperatuurverschil tussen de pijpen en de lucht. De trend in de loop van het jaar 1997 is te zien in Figuur 5. Het is niet verbazend dat het effect van de behandeling relatief het grootste is in de periodes waar vochtregeling een groot aandeel is van het energieverbruik. De grootste besparing (40%) werd gehaald in de maanden augustus en september, bij een energieverbruik dat in beide gevallen ongeveer 50% van het verbruik in februari was. Het kleinste verschil (14%) tussen de twee behandelingen was in het relatief koude en zonnige april.

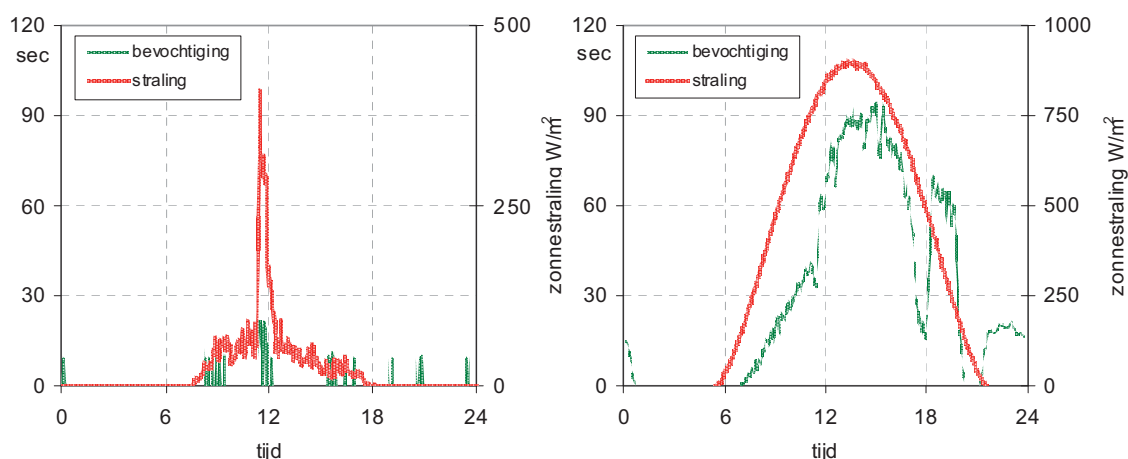
Het potentieel voor energiebesparing door vochtiger te telen wordt hierbij nog eens benadrukt.



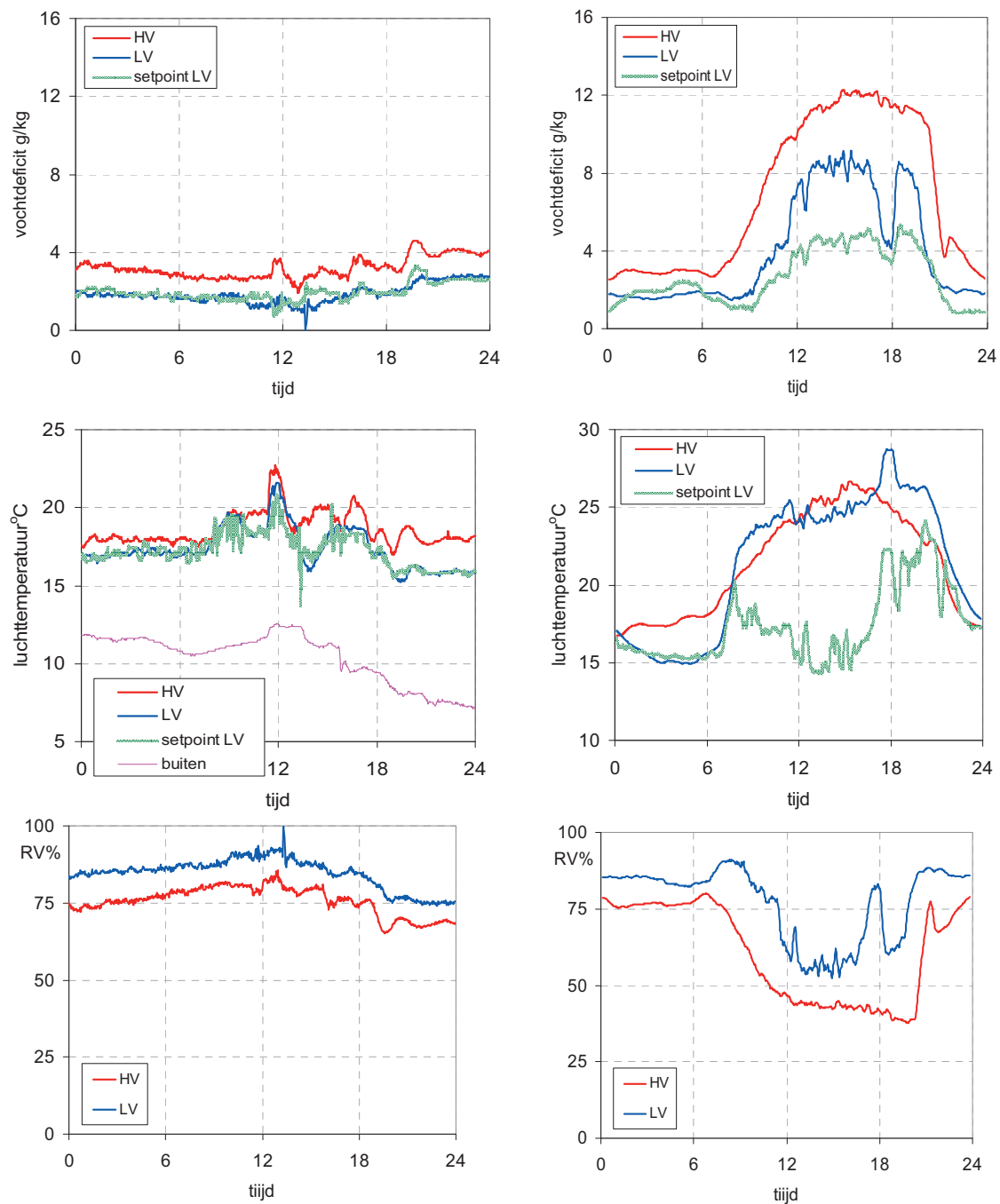
Figuur 5. Indicatie van de verhouding tussen het energieverbruik in de twee afdelingen. Als indicator wordt het temperatuurverschil tussen de verwarmingspijpen en de lucht, omdat de energieafgifte hiermee evenredig is. In totaal was het energieverbruik in de lage verdampingsafdeling 73% van het verbruik in de referentie. De lijnen zijn voortschrijdende gemiddelden over een week. Eind juni vond een wisseling van gewas plaats en in juli werd geen behandeling gegeven.

2.3 De klimaatsetpoints

Zoals verwacht resulteerden de berekende setpoints in 'vochtiger telen'. Als voorbeeld nemen we twee heel verschillende dagen, 2 Maart 1997, een zeer donkere dag, m.u.v. een zondoorbraak rond 12 uur (Figuur 5, links) en een zeer zonnige dag (Juni 3, 1997 Figuur 5, rechts). In Figuur 6 laten we de berekende setpoints voor luchttemperatuur en -vochtdeficit zien, samen met het klimaat in de twee kassen, voor dezelfde dagen. De rare piek rond 18 uur van de zonnige dag komt door een raamregeling (bedoeld om intrek van vogels te voorkomen) met een hogere prioriteit dan alle andere regelingen. De bijbehorende operatie van het bevochtigingssysteem is te zien in Figuur 6.



Figuur 6. Zonnestraling buiten de kas en secondes van operatie (uit de 120 secondes van elke cycle van de regeling) van de bevochtiging systeem. Het systeem was begrensd om ten minste 30 sec per cycle droog te staan. De capaciteit van het systeem was een zeer beperkte 170 g/m²·h. Links is een donkere dag (2 Maart) en rechts een zonnige (3 Juni).

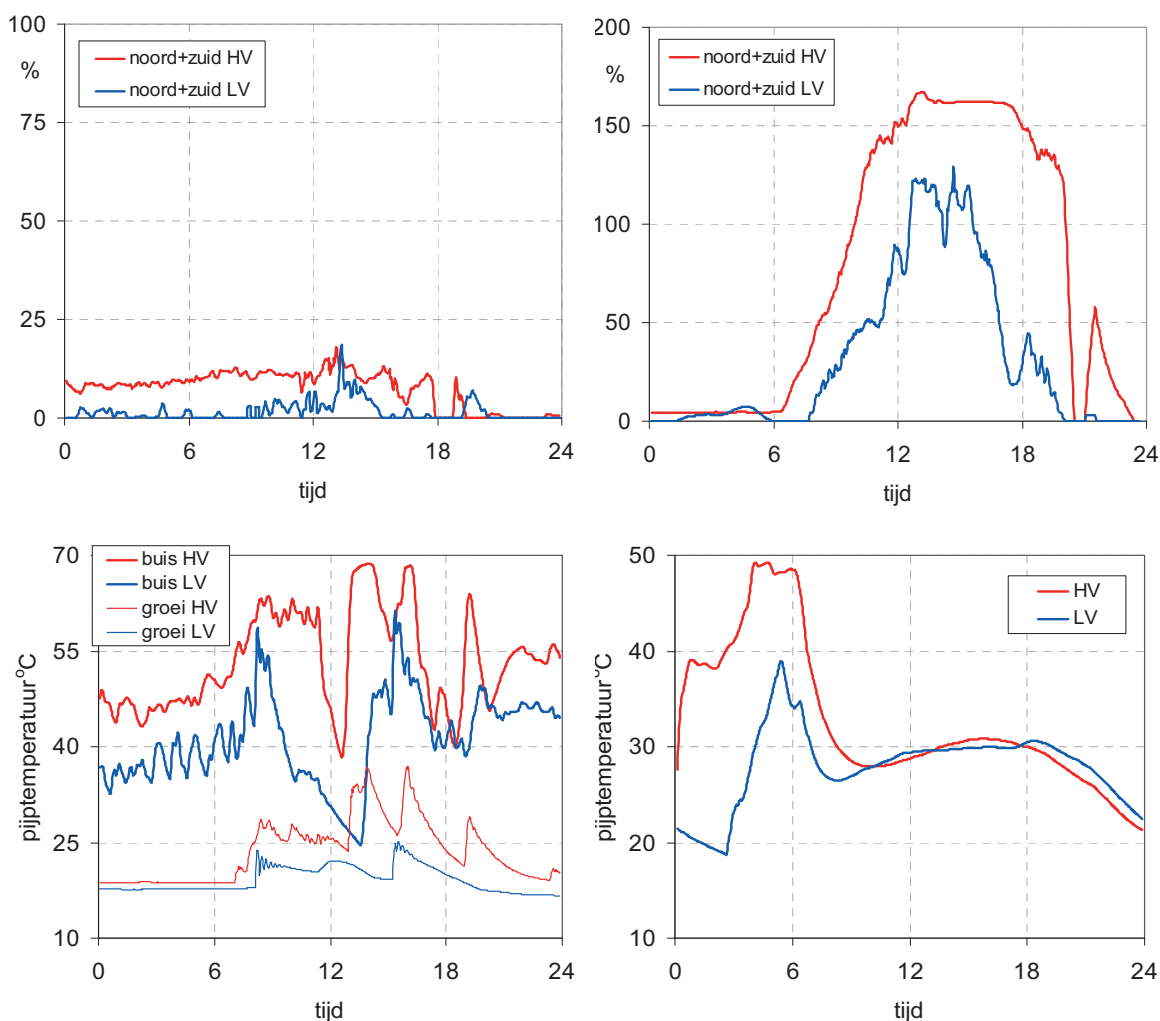


Figuur 7. Het klimaat in de referentiekas (hoge verdamping, HV) en in de lage verdamping (LV) kas, links voor een donkere dag (2 Maart 1997) en recht een zonnige dag (3 Juni 1997). De lage verdampingskas was aanzienlijk vochtiger, maar de regeling had veel meer moeite om de berekende setpoints te realiseren op de zonnige dag.

Indien de vereiste vochtdeficit niet gehaald werd (door de beperkingen van het systeem), zoals in de zonnige dag afgebeeld rechts, dan werd geprobeerd om de verdamping te verlagen door een lagere temperatuur. Dat een heel lage temperatuur niet te halen is in een gewone kas, met zulke buitenomstandigheden, is duidelijk te zien in de rechter kolom van Figuur 7. De watermetingen hebben aangetoond dat voor die dag de verdamping slechts met 20% verlaagd werd, i.p.v. de gewenste 35%.

Opvallender is dat de setpoints—zowel van temperatuur en van vochtdeficit—variëren, afhankelijk van de omstandigheden. Dat betekent dat dit algoritme flexibeler is dan een vaste grens aan temperatuur en/of vochtdeficit. In de donkere dag (linker kolom) is het verschil in vochtdeficit tussen de twee kassen vrijwel constant, terwijl in het begin van de nacht het algoritme de kastemperatuur meer heeft laten zakken in relatie tot de andere kas, dan in de nacht ervoor. Dit kan als volgt verklaard worden: door de koelere buitenlucht trad meer condensatie op (dan de nacht daarvoor), wat heeft geresulteerd in een drogere lucht, ook bij gesloten ramen (zie Figuur 8, links). Om de lucht vochtiger te krijgen moest dus bevochtigd worden (wat ook heel incidenteel is gebeurd). Verwarming had een hogere prioriteit (juist om te voorkomen dat er tegelijk wordt bevochtigd en verwarmd) dus is gekozen voor een lagere luchttemperatuur.

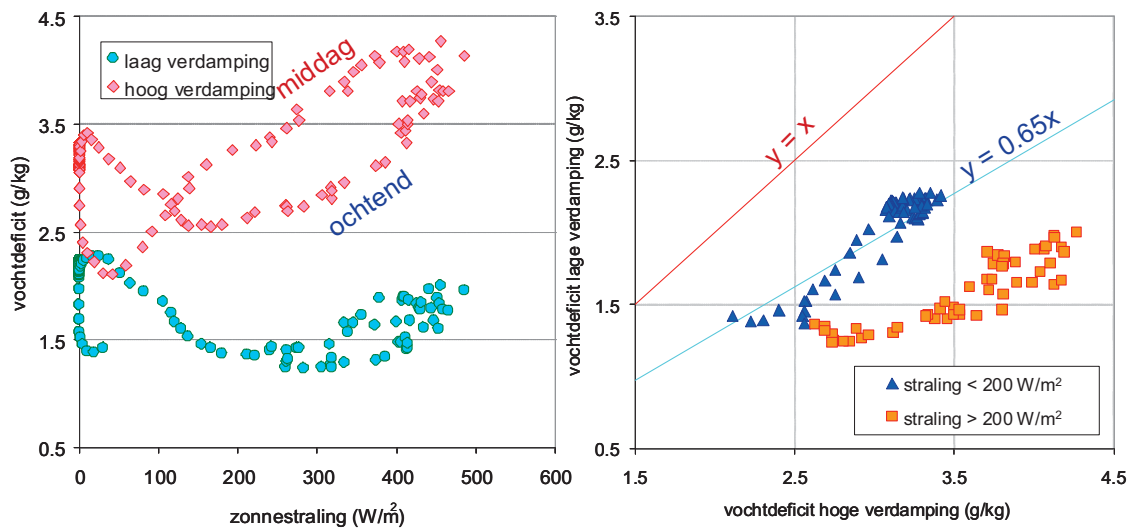
Het resulterend gedrag van de klimaatactuatoren (ventilatie en verwarming) is te zien in Figuur 8. Het is wel interessant om op te merken dat de buitenomstandigheden niet expliciet waren opgenomen in de regeling, terwijl de flexibiliteit van de regeling impliciet er rekening mee heeft gehouden. Geconcludeerd kan worden dat een ‘verdampingsregeling’ wel een stap gaat in de richting van flexibeler met de klimaatomstandigheden mee om gaan.



Figuur 8. Raamstand (boven) en temperatuur van de verwarming pijpen (onder), voor dezelfde dagen als Figuur 5 en 6, links een donker en rechts een zonnige dag. De raamstand is de som van de opening van beide kanten. Op de zonnige dag werd geen gebruik gemaakt van de groeipijp (niet afgebeeld).

De doelstelling van dit project was uit de metingen een 'patroon' te distilleren, dat als basis kon dienen voor een simpeler, in de praktijk toepasbaar, algoritme voor de sturing van de verdamping. Vele pogingen om de data statistisch te verwerken om trends te zoeken hebben tot niets geleid. Er was geen stabiele verhouding te bespeuren tussen de berekende set-points van de verdampingsregeling en de relevante klimaatvariabelen (straling, vochtdeficiet, relatieve vochtigheid en temperatuur). De poging om gegevens te zuiveren door middel van langdurige gemiddelden (dagtrend over een maand, b.v.) geeft wel boeiende inzichten, Figuur 9, maar geen duidelijke verband. De verdampingsregeling heeft een verzachtende invloed op de 'middagdepressie'. Het verband tussen het vochtdeficiet in de twee kassen is heel erg afhankelijk van de straling (rechter helft van Figuur 9), wat niet direct is te verklaren.

Er is daarom gekozen om de werking van het proces verdamping goed in kaart te brengen om de 'invloed regels' van de mogelijke sturingsfactoren expliciet te maken.

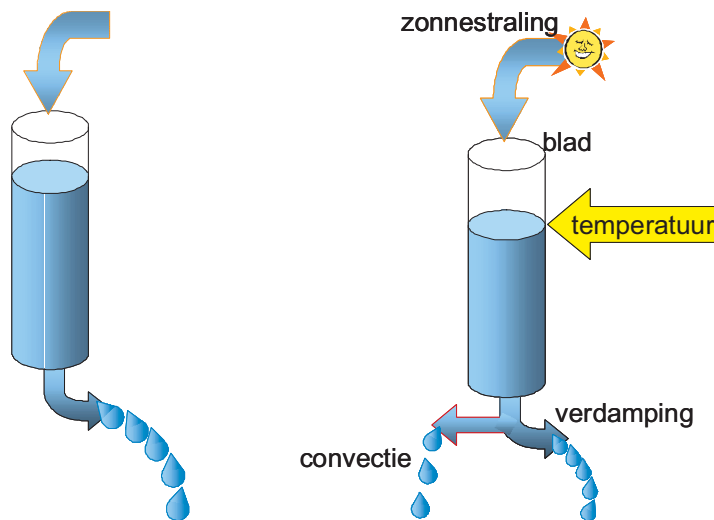


Figuur 9. Links: de vochtdeficiet vs de zonnestraling, iedere punt is de 10-min gemiddelde bij een bepaalde tijdstip over de hele maand april. Rose geeft de referentie aan en lichtblauw de lage verdampingsafdeling. In een 'gewone' kas is er een duidelijke dag cyclus te bespeuren en die wordt afgevlakt door de verdampingsregeling. Rechts: verhouding tussen het vochtdeficiet in de lage verdamping afdeling en dezelfde in de referentie. De punten zijn dezelfde als links, gesplitst in twee groepen: blauw, nacht en beperkte zonnestraling (tot 200 W/m²); oranje, zonnestraling boven 200 W/m².

3 Verdamping sturen, hoe?

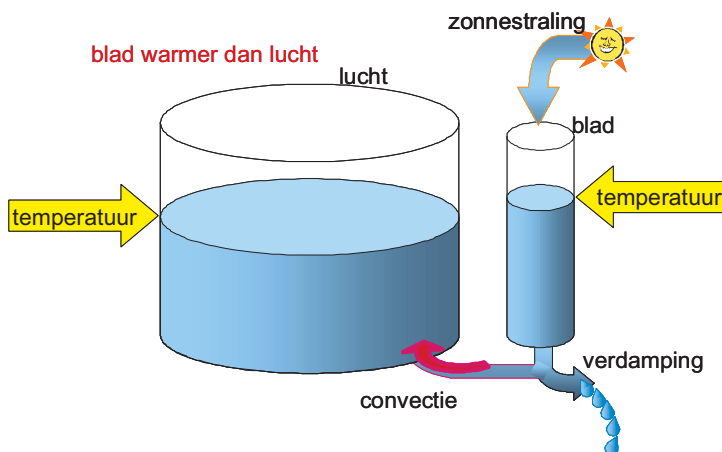
3.1 Welke factoren?

Hier worden de energiestromen en de energiebalans van een blad kwalitatief geschetst om te zien welke factoren een rol spelen bij het bepalen van de gewasverdamping, en dus aan welke 'knoppen' kan de klimaat regeling draaien om de verdamping te sturen.



Voor de uitleg gebruiken we de analogie van een vat met instroom van vloeistof en een of meerdere uitstromen. Als de instroom groter/kleiner wordt, dan wel de uitstroom kleiner/groter, rijst/zakt het peil van de vloeistof in het vat, tot een nieuw evenwicht. Bij het evenwicht is de instroom gelijk aan de som van alle uitstromen. Het debiet van de uitstroom hangt af van zijn afmeting en van de druk veroorzaakt door de bovenstaande vloeistof. Het uiteindelijke peil is dus het niveau dat ervoor zorgt dat instroom en uitstroom gelijk zijn. Links wordt dit vertaald naar de energiebalans van een blad, waarbij de bladtemperatuur de functie heeft van het vloeistofpeil. De energiebalans luidt:

$$\text{straling} = \text{convectie} + \text{verdamping}$$

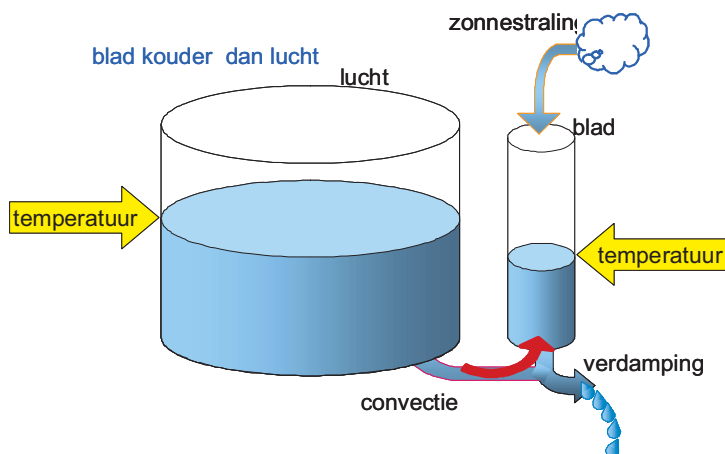


Echter een blad is niet in een 'lege wereld'. Zijn convectieve uitwisseling is met de omringende lucht, dat ook een temperatuur heeft. In onze analogie wordt dit vertaald door het vat 'blad' te laten communiceren met het vat 'lucht'. De druk op de 'convectie'-uitstroom wordt dus bepaald door het peilverschil tussen de twee vaten, oftewel convectie is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen blad en lucht.

$$\text{convectie} = K (T_{\text{gewas}} - T_{\text{lucht}})$$

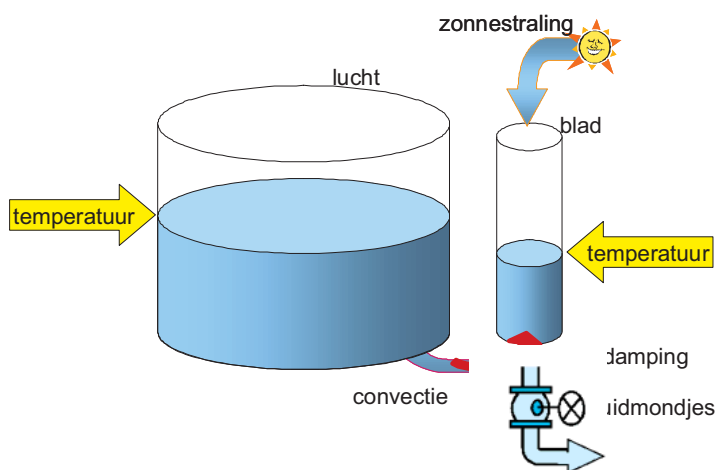
waar K een coëfficiënt is, die afhangt van het debiet op de connectie.

Voor de leesbaarheid is in bovenstaande analogie de in- en -uitstraling van het gewas in het langgolvige gebied (Far InfraRed, FAR) niet opgenomen. Het werking is gelijk aan convectie maar heeft een andere referentietemperatuur, de stralingstemperatuur van de omgeving, een 'gewogen' gemiddelde van de temperatuur van de omliggende oppervlaktes (dek dan wel scherm; grond, eventueel verwarmingspijpen). Daarbij hoort ook een 'debiet' dat is ongeveer $6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, onafhankelijk van het debiet van convectie en verdamping. Hierdoor wordt het verhaal complexer, maar niet anders. Aan de andere kant, de van temperatuur onafhankelijke 'instroom' is niet alleen zonnestraling, het kan ook belichting zijn.

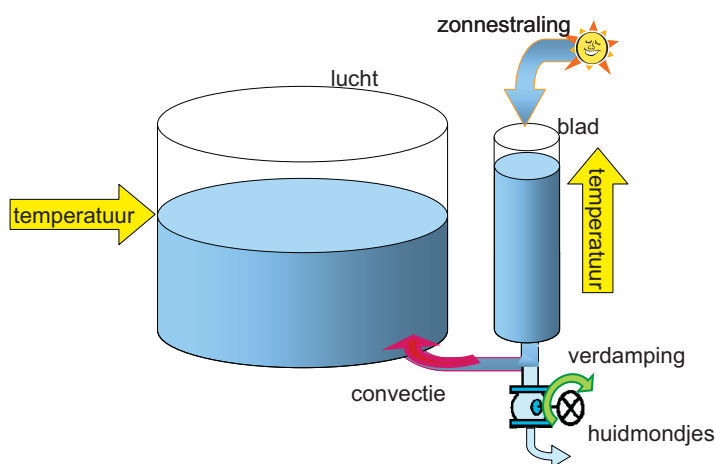


Wordt de instroom kleiner (b.v. geen of beperkte instraling van het blad), dan zakt het peil tot een nieuw niveau, dat ook onder het peil van het 'lucht'vat kan zijn. In dit geval zorgen de twee instromen samen voor de vloeistof die uit het 'verdamping' gat stroomt. Met andere woorden, dan wordt de energie voor de verdamping [gedeeltelijk] onttrokken aan de lucht door convectie. De energiebalans is dezelfde, maar convectie heeft een andere richting.

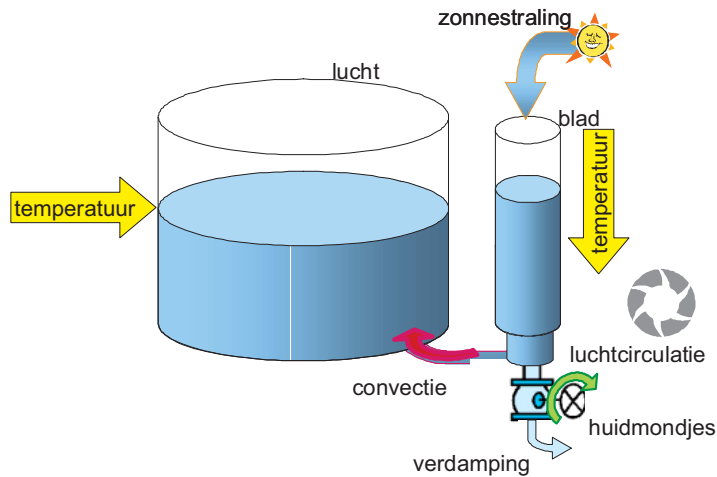
$$\text{straling} = \text{convectie} + \text{verdamping}$$



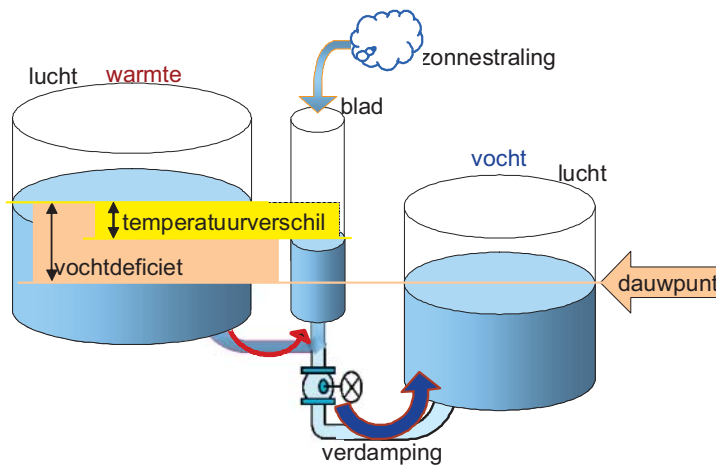
De functie van de huidmondjes is vergelijkbaar met een kraan op de 'verdamping' uitstroom



Gaat de kraan meer dicht, dan wordt de uitstroom langs die weg moeilijker, en het peil moet stijgen om dezelfde totale uitstroom (die moet immers gelijk aan de instroom zijn) langs de twee wegen te waarborgen. Met andere woorden, gaan de huidmondjes meer dicht, dan moet de gewastemperatuur stijgen en gaat het blad ook meer uitstralen.



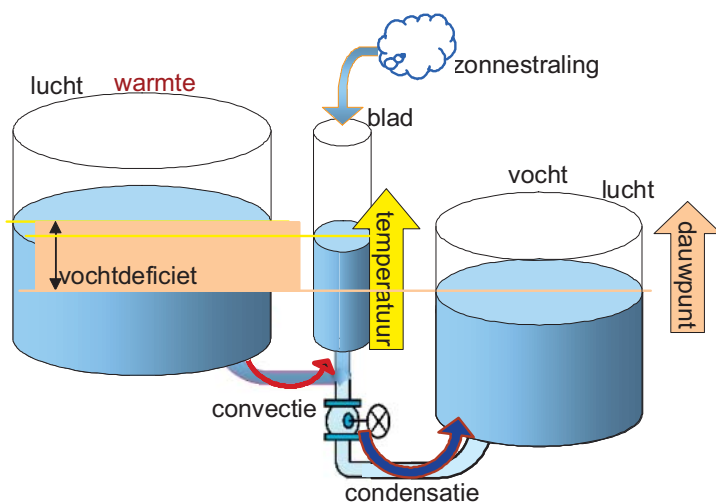
De functie van luchtbeweging of luchtcirculatie is vergelijkbaar met het vergroten van het debiet van beide uitstromen, 'stroomopvaarts' van de huidmondjes. De convectie wordt zeker bevorderd (het 'blad'peil komt dichterbij het 'lucht'peil', zowel als hij lager dan wel hoger daarvan is. Het effect op de verdamping is moeilijker te voorspellen, kan zowel omhoog als omlaag gaan, afhankelijk van de omstandigheden. Lucht circulatie maakt de coëfficiënt K groter.



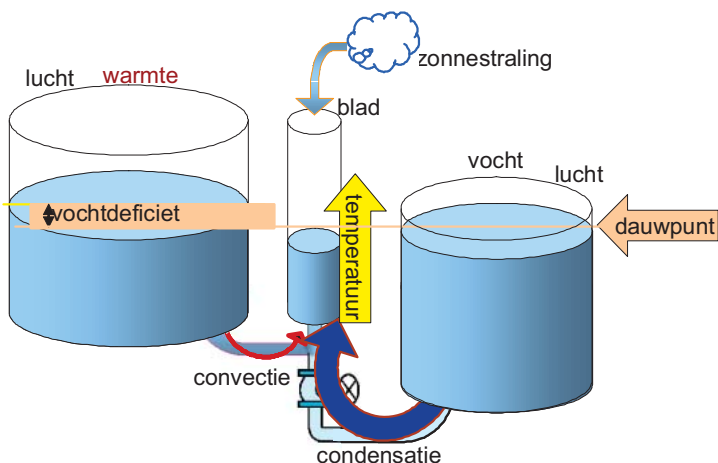
De verdamping heeft ook een 'referentiepeil', in de vochtinhoud van de lucht. In deze analogie (peilen=temperatuur) is die referentie het dauwpunt van de lucht.

$$verdamping = G (T_{\text{gewas}} - T_{\text{dauw}})$$

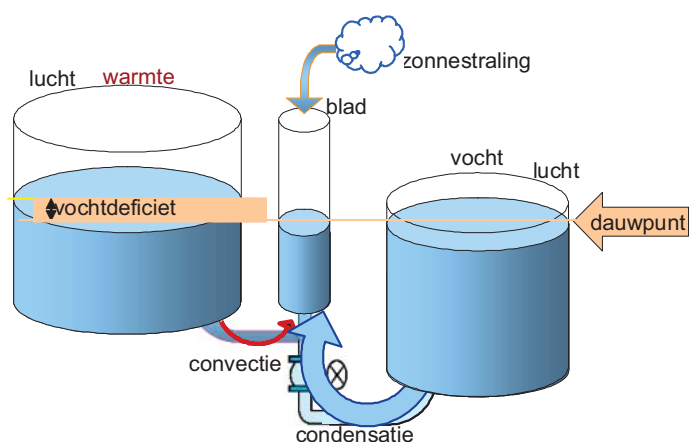
Waar G een coëfficiënt is, afhankelijk van het uitstroom debiet (K) en van de stand van de 'huidmondjes'kraan.



Als het dauwpunt stijgt, dan stijgt ook de temperatuur van het gewas: verdamping wordt namelijk moeilijker en alleen een hogere temperatuur kan de energiebalans waarborgen.



Als het dauwpunt stijgt boven de temperatuur van [delen van] het gewas, dan vindt condensatie plaats, en die gaat niet via de huidmondjes. Het is net als een 'overloop' zou zijn van het 'luchtvocht'vat naar het 'gewas'vat. Daardoor rijst het peil in het laatste = de temperatuur van het gewas stijgt door de energietoevoer van condensatie.



Het peil stijgt totdat het gelijk is aan het dauwpunt peil, en er treedt geen condensatie meer op. D.w.z. het dauwpunt van de lucht is de ondergrens voor de temperatuur van het gewas.

Het is dus een verkeerd begrip dat lucht circulatie altijd de verdamping stimuleert. Wat luchtcirculatie wel doet is de kans op condensatie op gewas[delen] te verkleinen. Risico van condensatie bestaat alleen als het gewas koeler is dan de lucht. Dan is het effect van luchtcirculatie (dichter brengen van gewas- en luchttemperatuur) een opwarming van het gewas, de gewastemperatuur komt dus verder af te staan van het dauwpunt.

Uit bovenstaande, kunnen we al vast afleiden welke 'klimaat'knoppen een tuinder kan gebruiken om de verdamping (en ook de temperatuur van het gewas) te beïnvloeden. Onderstaande tabel geeft een samenvatting.

Tabel 1. De klimaatfactoren waarmee de temperatuur van het gewas en de verdamping beïnvloed kunnen worden, en hoe. B.v. de eerste rij moet als volgt gelezen worden: als de zonnestraling omlaag gaat, dan gaan zowel de gewastemperatuur als de verdamping omlaag. De stralingstemperatuur van de omgeving kan beïnvloed worden door schermen (↑), door de temperatuur van het verwarmingssysteem (↑), of, b.v. door dakkoeling (↓).

Wat	Hoe	Effect op gewastemperatuur	Effect op verdamping
'zonne'straling	↓	↓	↓
luchttemperatuur	↑	↑	↑
luchtcirculatie	↑	dichter bij luchttemperatuur	hangt af
dauwpunt	↑	↑	↓
stralingstemperatuur van omgeving	↑	↑	↑

Tabel 2. Het dauwpunt (°C) bij de aangegeven combinaties van luchttemperatuur en RV. De tweede kolom geeft de verzadigde dampconcentratie bij de luchttemperatuur in de linker kolom. Bij 100% RV is het dauwpunt vanzelfsprekend gelijk aan de luchttemperatuur. In de lege cellen zou het dauwpunt verondersteld zijn, en is de berekening, die hier is toegepast, niet betrouwbaar.

	RV %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$T_{\text{lucht}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\chi^* \text{ g m}^{-3}$										
10	9.5					-0.5	2.2	4.4	6.5	8.3	10
13	11.5					2.2	5	7.3	9.4	11.3	13
16	13.8				1.7	5	7.8	10.2	12.3	14.2	16
19	16.5			0.1	4.3	7.8	10.6	13.1	15.2	17.2	19
22	19.7			2.6	7	10.5	13.4	15.9	18.1	20.1	22
25	23.3		-0.9	5.2	9.6	13.2	16.1	18.7	21	23	25
28	27.6		1.7	7.8	12.3	15.9	19	21.6	24	26	28
31	32.4		4.1	10.3	15	18.7	21.8	24.5	26.9	29	31
34	38.0		6.5	12.9	17.6	21.4	24.6	27.3	29.8	32	34
37	44.4		8.9	15.4	20.2	24.1	27.3	30.2	32.7	34.9	37
40	51.8	0.7	11.3	17.9	22.8	26.8	30.2	33	35.6	37.9	40

De verdamping is 'evenredig' met het temperatuurverschil tussen het gewas en het dauwpunt van de lucht. Het is wel belangrijk om op te merken dat de coëfficiënt (de toename van verzadigde concentratie bij 1°C toename van luchttemperatuur) een sterke functie van temperatuur is (zie het rechter helft van Figuur 9). Dus, als de gewastemperatuur en de 'debieten' onveranderd zouden blijven, kan de gewasverdamping gestuurd worden door sturing van het dauwpunt van de lucht (voor de relatie met RV en luchttemperatuur, zie Tab. 2).

3.2 Vertaling in formules

Laten we proberen om het bovenstaande schema in formules te vertalen. Hier voegen we wel de in- en uitstraling expliciet toe. Beginnen met de energiebalans:

$$AI_s = k_H(T_g - T_l) + k_R(T_g - T_R) + k_E(T_g - T_d) \quad \text{W m}^{-2} \quad (1)$$

Waarbij A de fractie van zonnestraling is die door het gewas wordt geabsorbeerd, k_H , k_R en k_E zijn de overdrachtscoëfficiënt ('debieten') van respectievelijk voelbare warmte, langgolvlige straling en verdamping in $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$, T_g , T_l , T_R en T_d zijn respectievelijk: temperatuur van het gewas, van de lucht, de effectieve stralingstemperatuur van de omgeving en het dauwpunt.

De gewastemperatuur heeft het niveau waarbij de energiebalans klopt:

$$T_g = \frac{AI_s + k_H T_l + k_R T_R + k_E T_d}{k_H + k_R + k_E} \Rightarrow T_g - T_d = \frac{AI_s + k_H(T_l - T_d) + k_R(T_R - T_d)}{k_H + k_R + k_E} \quad \text{K} \quad (2)$$

Een eerste belangrijke opmerking is dat het streven om de gewastemperatuur minimaal een afstand D boven het dauwpunt te houden (om het risico van condensatie op gewasdelen klein te houden) overeen komt met het streven naar een minimale verdamping, afgezien van de factor k_E . De factor k_E wordt hieronder bepaald.

Gewasverdamping is een diffusieproces zoals vele anderen. Het is bekend dat de massastroom door diffusie evenredig is met het concentratieverschil. Als we met E de verdampingstroomdichtheid aangeven (per eenheid oppervlakte en eenheid tijd) en met χ de concentratie (g m^{-3}):

$$E = 2LAI \frac{\chi_{\text{gewas}} - \chi_{\text{lucht}}}{r_s + r_b} \quad \text{g m}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (3)$$

Waar de denominator 'de weerstand' is voor de snelheid van het diffusieproces. Het is zo geschreven om rekening te houden met het feit dat de waterdamp die vrij komt eerst door de huidmondjes heen moet ($r_s = \text{huidmondjes weerstand}$) en daarna door de bladgrenslaag ($r_b = \text{grenslaag weerstand}$). De suffixen zijn zo gekozen (uit het engels stomata en boundary layer) om geen verwarring te scheppen met de suffixen in vergelijkingen (1) en (2).

De factor 2 LAI (bladoppervlakte index) is de vertaling van vierkante meters verdampende oppervlakte naar vierkante meters grondoppervlakte. De keuze van 2 maal de LAI als referentieoppervlakte is enigszins arbitrair: er zijn gewassen met huidmondjes slechts aan een kant van de bladlamina, en het 'verdampingsvermogen' van jonge en oude bladeren is niet hetzelfde. Eigenlijk kan geen model rekening houden met al deze variaties. Gezegd kan worden dat door vergelijking (3) een 'huidmondjesweerstand' wordt gedefinieerd, dat is een soort 'gewogen gemiddelde' van de weerstanden van elke eenheid bladoppervlakte, in het hele gewas. Dat hoeft dus niet hetzelfde te zijn van wat men met een porometer zou meten. Een belangrijke reden om alle bladeren met beide zijden te laten tellen is de analogie met de uitwisseling van warmte, waardoor deze notatie de voorkeur heeft in de literatuur (e.g. Koerner, *et al.*, 1979).

De toepasbaarheid van deze formule(s) wordt echter beperkt door het feit dat de waterdampconcentratie van het gewas niet bekend is. Ergens in de het blad is wel water en precies waar dit verdampt (op de binnenoppervlakte van de huidmondjesholtes) is er verzadiging. Omdat het bladweefsel vrijwel allemaal water is, en water een goede warmtegeleider is, wordt vaak aangenomen dat de temperatuur binnen de huidmondjes gelijk is aan de temperatuur van de bladoppervlakte. De vergelijking (3) kan herschreven worden:

$$E = 2LAI \frac{\chi_{T_{\text{gewas}}}^* - \chi_{T_{\text{dauw}}}^*}{r_s + r_b} \quad \text{g m}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (4)$$

Waar de superscript * betekent 'verzadigd'. Daarnaast wordt in vgl. (4) de definitie gebruikt van dauwpunt als de temperatuur waarbij de lucht met een gegeven vochtigheid verzadigd zou zijn. Het verschil in verzadigde dampconcentratie kan benaderd worden door de linearisatie, omschreven in Figuur 10 (links), zodat, als T_{g-d} het gemiddelde is tussen gewas temperatuur en dauwpunt:

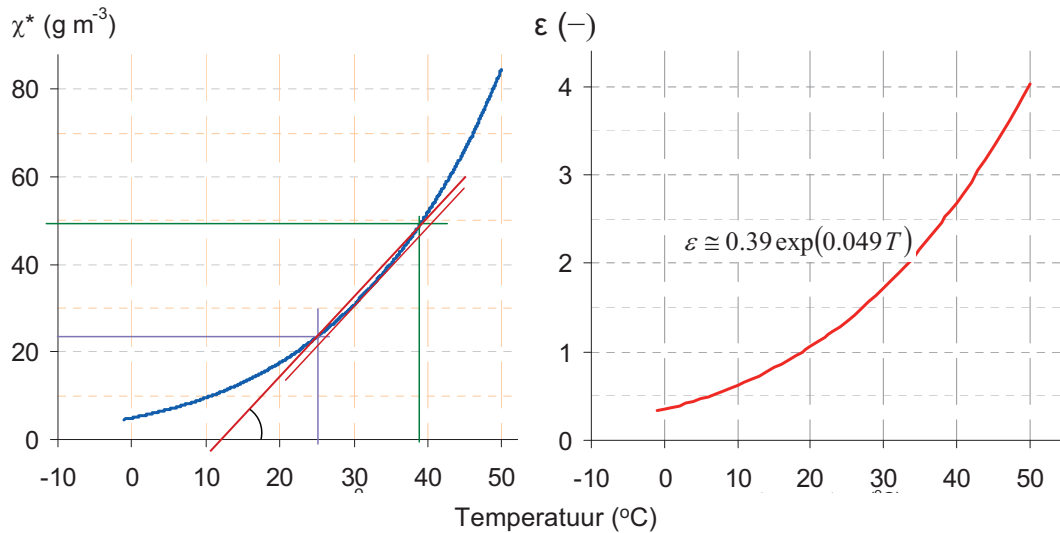
$$E \cong 2LAI \frac{\left. \frac{d\chi^*}{dT} \right|_{\text{berekend bij } T_{g-d}} (T_{\text{gewas}} - T_{\text{dauw}})}{r_s + r_b} = 2LAI \frac{\rho c}{L} \varepsilon_{T_{g-d}} \frac{T_{\text{gewas}} - T_{\text{dauw}}}{r_s + r_b} \quad \text{g m}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (5)$$

waar ρc de voelbare energie inhoud is van de lucht (ongeveer $1200 \text{ J m}^{-3} \text{K}^{-1}$), L de verdampingsenergie (ongeveer 2500 J g^{-1}). ε (afgebeeld in Figuur 10, rechts) is de dimensieloze verhouding tussen de toename in latente en voelbare energie van de lucht, met een temperatuurstoename van 1°C .

Vergelijking van formule (5) met formule (1), waar de verdamping wordt meegenomen als energiestroom (dus de massastroom maal de verdampingsenergie), maakt het mogelijk om de 'overdrachtscoëfficiënt' k_E weer te geven:

$$k_E = 2LAI \frac{\rho c}{r_s + r_b} \varepsilon_{T_{g-d}} \quad \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1} \quad (6)$$

$$\text{En} \quad k_H = 2LAI \frac{\rho c}{r_b} \quad \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1} \quad (7)$$



Figuur 10. Links: Verzadigde dampconcentratie (χ , g m^{-3}) bij de luchttemperatuur aangegeven op de x-axis. Het verschil in dampconcentratie (de groene en paarse lijnen) kan benaderd worden met het verschil in temperatuur maal de helling van de lijn door de twee punten. Dat is gelijk aan de raaklijn van de curve halverwege de twee punten. De raaklijn wordt berekend d.m.v. de afgeleide (de toename van de verzadigingsconcentratie bij 1°C temperatuurstoename, $d\chi^/dT = \rho c/L \cdot \varepsilon$). De functie ε is rechts afgebeeld.*

Een linearisatie zoals in Figuur 10 maakt ook mogelijk om de ‘overdrachtscoëfficiënt’ voor langgolelige straling te bepalen vanuit de wet van Stefan-Boltzmann (Monteith, 1973). Hij is niet sterk afhankelijk van temperatuur (bij ‘gangbare’ temperaturen) en is 5.2; 5.7 en 6.3 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ bij 10, 20 en 30°C respectievelijk. De vertaling van gewas- naar grondoppervlakte is anders dan bij verdamping en convectie, omdat alle bladeren die door andere bladeren bedekt worden, niet bijdragen aan de uitwisseling met de omgeving. Wat wel bij draagt is de projectie (zowel naar beneden als naar boven) van alle bladeren, dat is twee keer de grondbedekking (respectievelijk met de bovenste en onderste helften van de ‘wereld’). De grondbedekking is altijd kleiner dan 100% en vergelijkbaar (10% groter) met de absorptie coëfficiënt voor zonnestraling, Figuur 11.

$$k_R \cong 2 \cdot 5.7 \cdot 1.1 A \cong 12 A$$

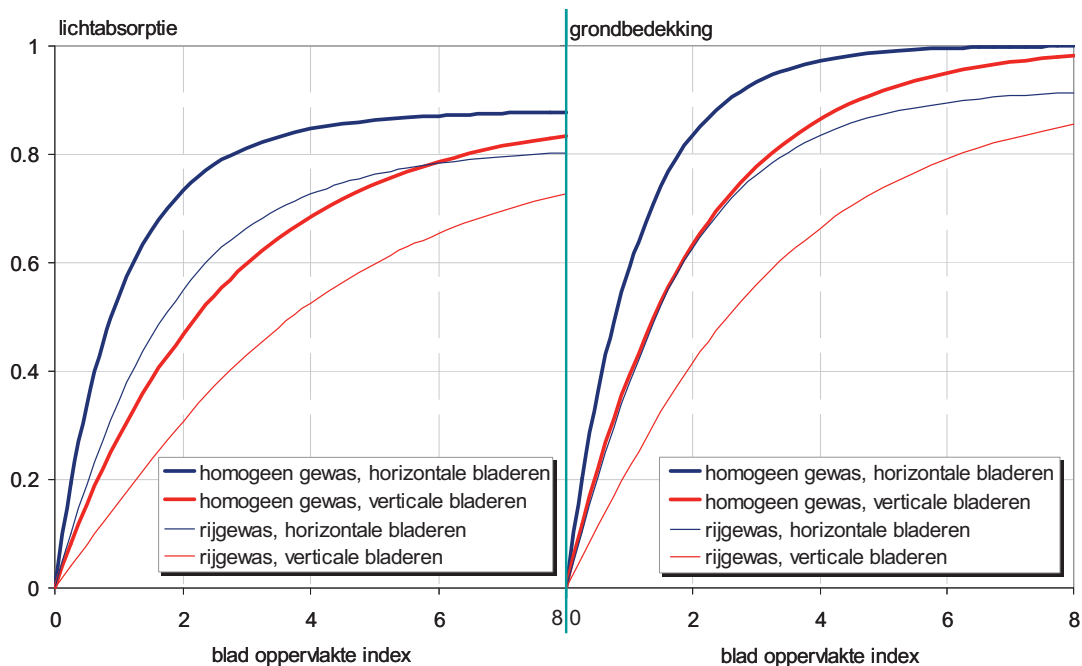
$$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1} \quad (8)$$

En de verdamping, formules (1) en (2) wordt dus:

$$LE = k_E (T_g - T_d) = \frac{\frac{\varepsilon_{T_{g-d}}}{r_s + r_b}}{\frac{1}{r_b} + \frac{\varepsilon_{T_{g-d}}}{r_s + r_b} + \frac{12 A}{2 LAI \rho c}} \left[AI_s + 2 LAI \frac{\rho c}{r_b} (T_l - T_d) + 12 A (T_R - T_d) \right] \quad \text{W m}^{-2} \quad (9)$$

Het kan best nuttig zijn om wat getallen in deze droge formule te plaatsen: ρc is $1200 \text{ J m}^{-3} \text{K}^{-1}$. De grenslaag weerstand ligt in een kas tussen de 100 s m^{-1} (geforceerde lucht bij kleine bladeren); 200 s m^{-1} (natuurlijke luchtbeweging bij tomaat) tot hoogstens 300 s m^{-1} (natuurlijke luchtbeweging bij grote bladeren, zoals komkommer).

De absorptie coëfficiënt A kan berekend worden door middel van modellen, rekening houdend met de gewasstructuur. Een paar voorbeelden zijn te zien in Figuur 11. De huidmondjes weerstand kan variëren tussen 200 s m^{-1} (volle zon, geen stress) en 2000 s m^{-1} in het donker.



Figuur 11. Links: de absorptie coëfficiënt A voor zonnestraling als functie van het bladoppervlakte index. De dikke lijnen geven een homogeen gewas aan, de dunne een rijgewas. Blauw is voor een gewas met vrij horizontale bladeren en rood voor vrij verticale bladeren. Rechts, de grondbedekking als functie van het bladoppervlakte index, voor dezelfde gewassen. De codering van de lijnen is hetzelfde. Door de reflectie van het gewas voor zonnestraling kan A niet 1 worden, zelfs bij zeer grote bladoppervlakte indexes. Grondbedekking heeft een vergelijkbaar verloop, het kan wel 1 naderen. Na Stanghellini en De Jong, 1995.

3.3 Hoe groot is het effect van elke stuurfactor?

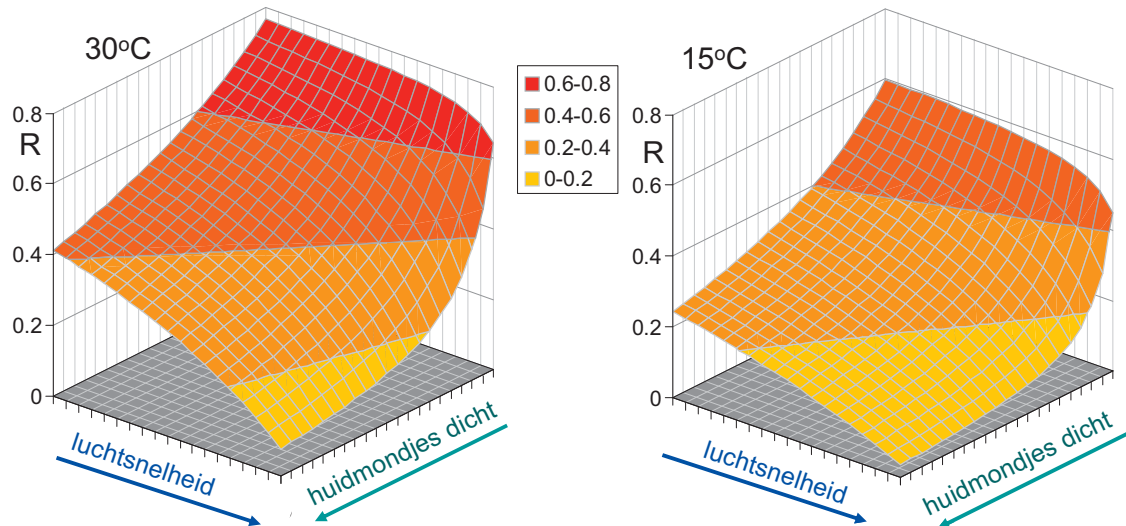
Natuurlijk is het niet genoeg om te zeggen, b.v., dat als het dauwpunt omhoog gaat, de verdamping dan ook omhoog gaat. Men wil ook weten hoeveel. Wordt door een verhoging van een graad in het dauwpunt de verdamping gehalveerd of is het effect nauwelijks te merken? Wil je iets regelen, dan moet je ook weten hoe groot is de response. In de wiskunde wordt dit voorbeeld zo geschreven:

$$\Delta \text{verdamping} = R \cdot \Delta \text{dauwpunt} \quad (10)$$

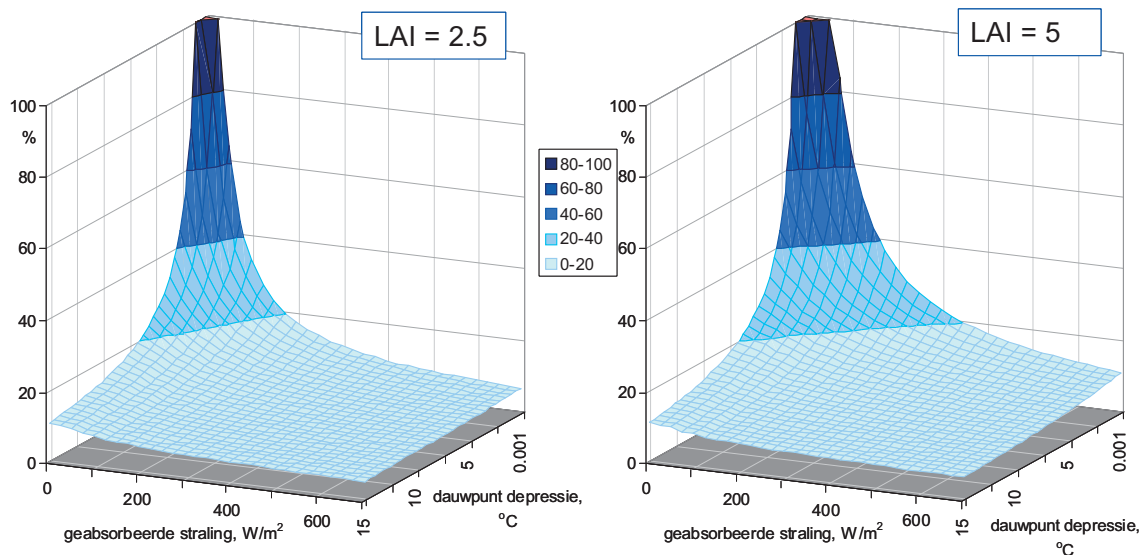
Waarbij R 'de afgeleide van verdamping t.o.v. dauwpunt' is en aangeeft hoe groot de variatie is van verdamping t.o.v. een gegeven variatie in het dauwpunt, in dit voorbeeld, **als alle andere factoren gelijk blijven**—wat zelden het geval is in een reële kas. De factor R is wel afhankelijk van de momentane waarden van alle andere variabelen. Er zijn wiskundige regels waarmee de formule voor de relatie tussen verdamping (9), of ook de gewastemperatuur (2) en de klimaatvariabele die je wilt gaan aanpassen, kunt 'afleiden'. Het wordt wellicht te saai om het allemaal hier te doen. Hier proberen we met behulp van figuren het effect van de 'klimaatknoppen' te kwantificeren.

Figuur 12 laat de factor R van formule (10) voor verdamping vs straling zien, en hoe dit afhankelijk is van de momentane waarden van de huidmondjesweerstand en de luchtsnelheid (hoe hoger de luchtsnelheid, hoe kleiner de grenslaagweerstand), en van luchttemperatuur (links 30 graden C, dan wel rechts 15 graden C). De Figuur moet als volgt gelezen worden: per W m^{-2} toename in geabsorbeerde straling treedt een toename van $R (<0.8) \text{ W m}^{-2}$ in de verdampingsenergie op. Hoe groot de toename is, hangt af van temperatuur, en ook van de huidmondjes en luchtsnelheid. Hoe hoger de luchtsnelheid (dan wel hoe groter de huidmondjes weerstand) des te kleiner het effect van de verandering in straling. Om 1 gram water te verdampen, wordt een hoeveelheid energie (latente warmte) gebruikt,

ongeveer gelijk aan 2500 J. Dus een verdampingsenergie van, bv. 250 W m^{-2} betekent de verdamping van $0.1 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Het is ook goed om zich te realiseren dat bv. 1 W m^{-2} verandering in geabsorbeerde straling wel betekent een grotere verandering in de stralingsbron: een gewas absorbeert nooit alles: ook een heel 'dicht' gewas heeft een absorptie A onder 80%. Daarnaast, als het betreft zonnestraling, moet er ook rekening gehouden worden met de doorlatendheid van het dek.



Figuur 12. Respons van de verdamping (W m^{-2}) als de geabsorbeerde zonnestraling/kunстlicht verandert met 1 W m^{-2} . Links bij een luchttemperatuur van 30°C en rechts van 15°C . De respons wordt ook beïnvloed door de huidmondjesstand (hoe dichter hoe kleiner de respons), en door de luchtsnelheid (hoe hoger, hoe kleiner de respons)



Figuur 13. Procentuele toename van de verdamping met een toename van 1°C van de luchttemperatuur, dan wel een **afname** met 1°C van het dauwpunt. Links voor een bladoppervlakte index van 2.5 (tomaat), rechts een bladoppervlakte index van 5 (paprika). Om de Figuur te berekenen is aangenomen dat de effectieve stralingstemperatuur van de omgeving ongeveer gelijk is aan het dauwpunt (aannemelijk in een kas). Het procentuele effect van temperatuur is groot alleen bij bijna verzadigde lucht en in het donker. Dat zijn de omstandigheden waarbij de verdamping klein is.

Het effect van temperatuur (lucht, dauwpunt of stralingstemperatuur) is beter kwantificeerbaar in termen van procentuele verandering van verdamping per graad temperatuurverandering, omdat dan de afhankelijkheid op de huidmondjesopening verdwijnt, en die van luchtsnelheid heel klein wordt. Kwalitatief is het effect hetzelfde voor alle drie (lucht-, omgevingstemperatuur en dauwpunt), omdat ze in een vergelijkbare wijze voorkomen in vergelijking (9). Natuurlijk neemt de verdamping af met een toename van het dauwpunt, in tegenstelling tot het effect van de andere twee temperaturen. De factoren die een rol spelen bij het bepalen van de responsie zijn de geabsorbeerde straling en de dauwpuntdepressie (Figuur 13), terwijl alle andere factoren (weerstanden, waarde van de andere temperaturen, bladoppervlakte) een secundair effect hebben.

Uit Figuur 13 kunnen we lezen dat voor een afname van de verdamping met 35% zoals in onze experimenten, het dauwpunt overdag moest toenemen met zo'n 3 a 4°C, terwijl 's nachts slechts 1°C dauwpuntstoename tot 35% minder verdamping leidde.

4 Een simpel model voor vochtsturing

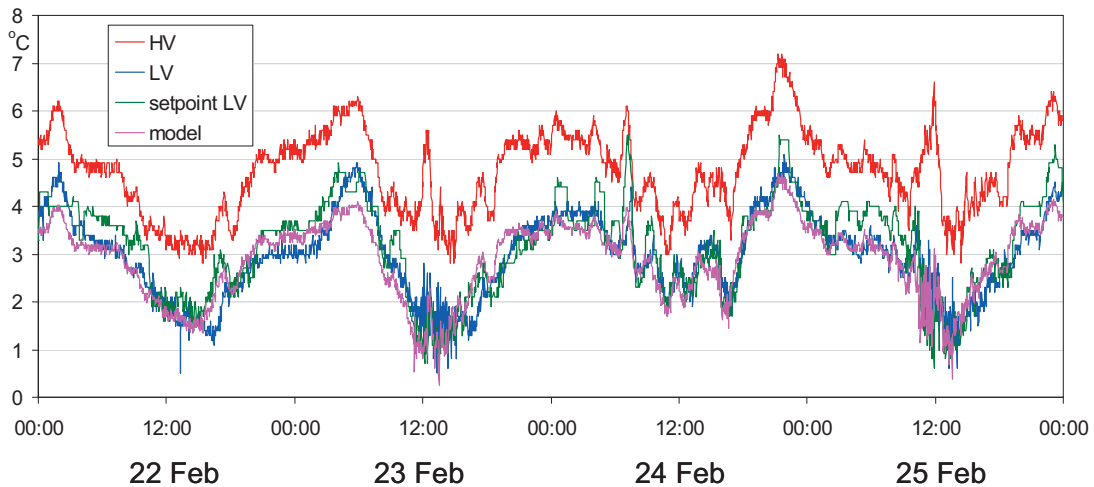
Het omschrijven van de verdamping in termen van dauwpunt depressie i.p.v. vochtdeficiet, en het omzetten van de effecten in procentuele termen, hebben een doorbraak betekend voor dit project. Daardoor zijn alle stukken op hun plaats gevallen. De aanpassing van de dauwpuntdepressie die in zijn eentje een verlaging met B% van de verdamping (dus zonder te sleutelen aan andere factoren) kan waarborgen, kan zo berekend worden (zie bijlage I):

$$T_l - T_{d,nieuw} = (1 - B)(T_l - T_{d,old}) - B \cdot \frac{r_b}{2LAI\rho c} AI_s \quad ^\circ\text{C} \quad (11)$$

In ons geval B was 35%. De grenslaag weerstand werd geschat op 200 s m^{-1} en $LAI = 2.5$, dus de coëfficiënt van AI_s was $0.033 \text{ [K per W m}^{-2}]$. $A = 0.65$ (doorlatendheid van de kas) * 0.64 (tweede lijn van boven in Figuur 10, bij LAI 2.5) = 0.416 . Dit betekent dat de 'setpoint dauwpuntdepressie' van de verdampingsregeling verklaarbaar moet zijn door:

$$(T_l - T_d)_{LV} = 0.65(T_l - T_d)_{HV} - 0.0048 I_s \quad ^\circ\text{C} \quad (12)$$

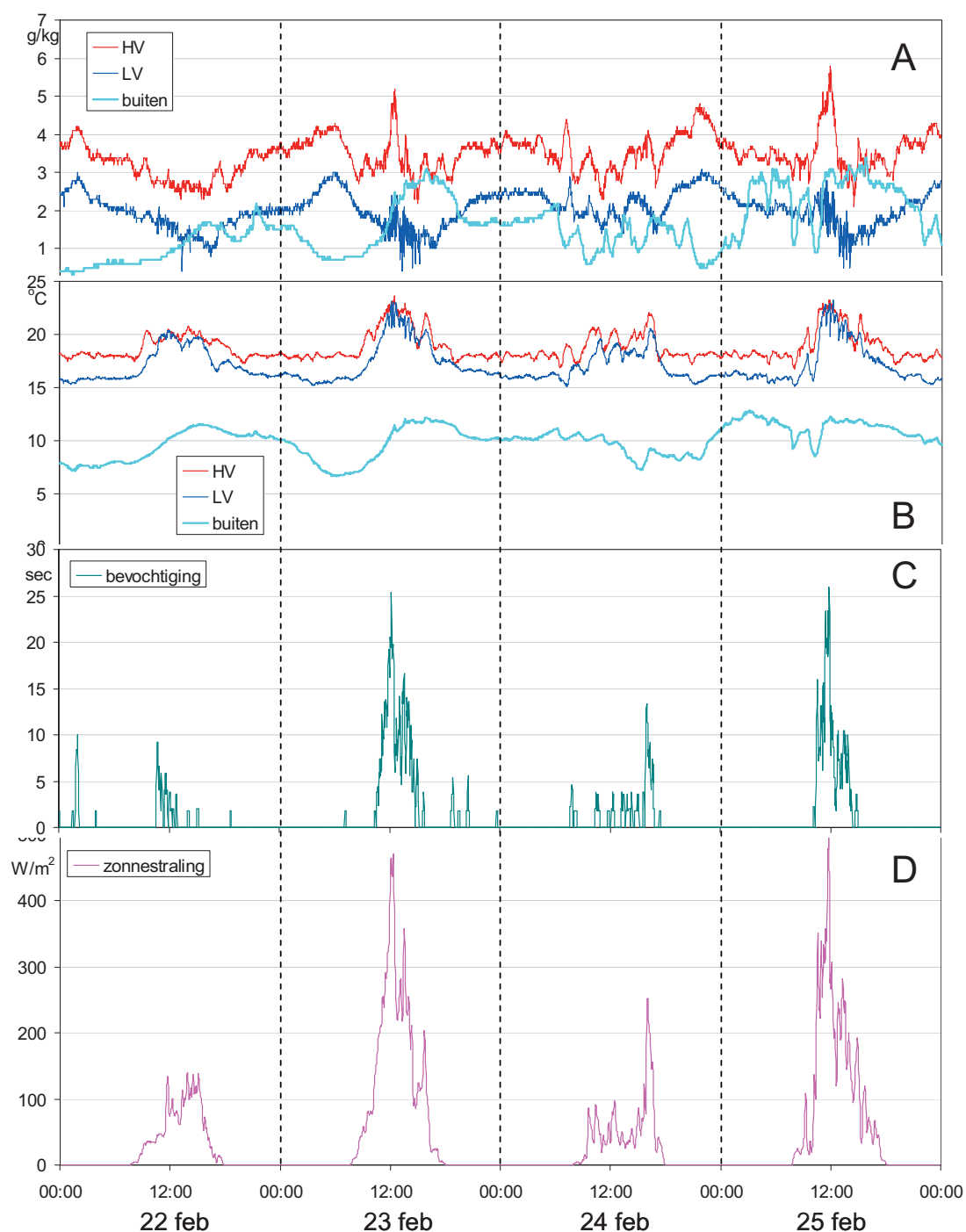
waar de suffixen LV en HV respectievelijk staan voor lage en hoge verdamping, en I_s de zonnestraling buiten de kas (W m^{-2}) is. Doordat de verdampingsregeling echter met een vochtdeficiet (g/kg) setpoint werkte, is hier een 'setpoint dauwpunt depressie' berekend d.m.v. het setpoint luchttemperatuur en het setpoint vochtdeficiet. In Figuur 14 laten we zien dat vergelijking (12) het gedrag van de 'setpoint' heel goed kan reproduceren.



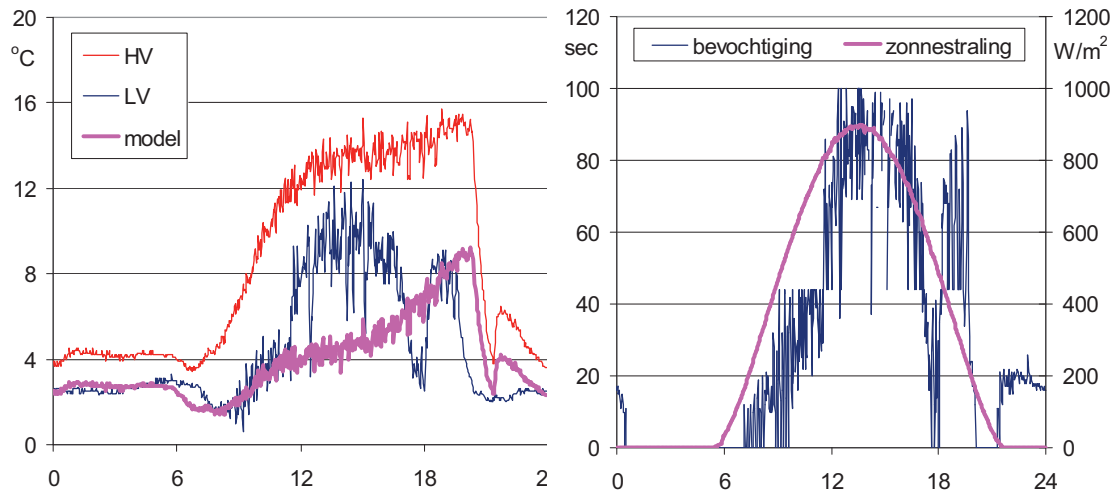
Figuur 14. De dauwpuntdepressie, voor vier dagen (twee zonnige en twee niet, zie Figuur 14). De rode en de blauwe lijn zijn de gemeten waarden in de HV en LV kas, respectievelijk, de groene lijn is het 'setpoint' dauwpunt depressie resulterend uit de toen berekende setpoints van luchttemperatuur en vochtdeficiet, en de roze lijn is het huidige model (vgl. 12).

Wat ook interessant is, is dat een gewenste dauwpuntdepressie bereikt kan worden door het dauwpunt en/of de luchttemperatuur aan te passen. Door de prioriteitstelling, koos de regeling duidelijk voor het aanpassen van luchttemperatuur 's nachts en het dauwpunt overdag te verhogen door minder ventilatie en bevochtiging, Figuur 15. Het gebeurt niet gauw dat vergelijking (12) een negatieve depressie zou berekenen, omdat zonnestraling niet meer dan 1000 W m^{-2} kan zijn, en in zulke omstandigheden het onwaarschijnlijk is dat de 'referentie' dauwpuntdepressie kleiner is dan $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Als dat het geval is (heel vochtig lucht onder hoog zon), is er weinig dat men kan doen om de

verdamping te verlagen, behalve schermen. Wat wel vaker kan gebeuren is dat de regeling tegen de grenzen van het bevochtigingssysteem loopt. Dat is wel eens gebeurd in onze proeven vanwege de relatief lage capaciteit van het bevochtigingssysteem (Figuur 16).



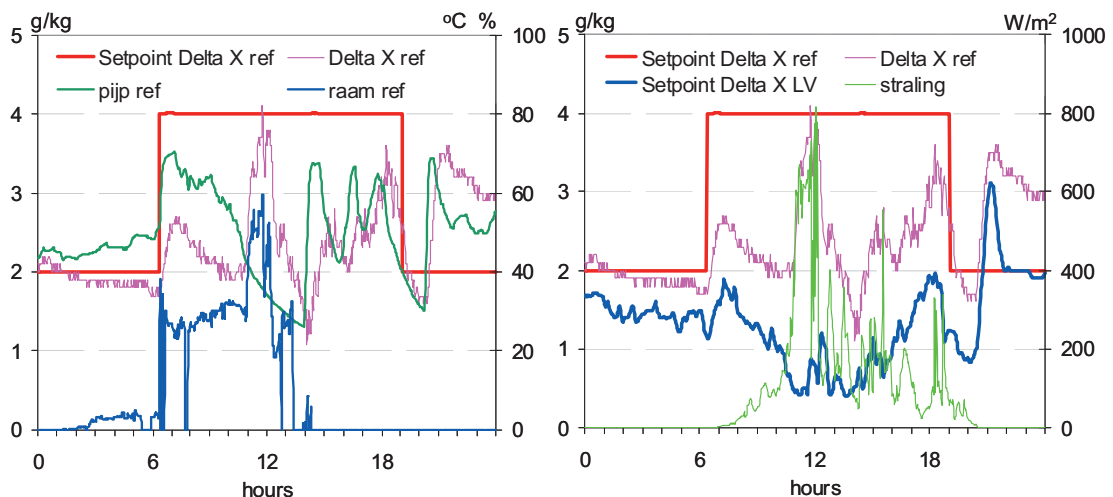
Figuur 15. Meetwaarden voor dezelfde 4 dagen als in Figuur 13. A: vochtdeficiet (g/kg) gemeten in de kas met hoge verdamping (HV), en met lage verdamping (LV) en buiten. B: luchttemperatuur in de twee kassen (HV en LV) en buiten. C: de operatietijd van de bevochtiging (in seconden per regelcyclus van 120 seconden) en D: de zonnestraling buiten de kas.



Figuur 16. Links: de dauwpuntdepressie in de hoge en lageverdampingskas op een zonnige dag, en de berekende depressie d.m.v. vergelijking (12). Rechts: zonnestraling en operatietijd van de bevochtiging in sec op een regelcyclus van 120 sec. De operatietijd was begrensd op ongeveer 100 sec.

4.1 Discussie

Het algemeen model, vergelijking (11), zegt in feite dat het vochtiger kan worden in de mate dat de zonnestraling/belichting hoger is. Dit is logisch ook voor vochtregeling tegen ziektedruk: vergelijking (2) toont aan dat de gewas-temperatuur verder af komt te staan van het dauwpunt, in de mate dat zonnestraling toeneemt. Dit kan heel veel energie besparen, t.o.v. een traditionele vochtregeling, zoals afgebeeld in Figuur 17. Een traditionele regeling probeert de kas droger te houden dan een vastgestelde setpoint (vochtdeficiet dan wel relatieve vochtigheid), meestal droger overdag. Dit kan in bepaalde omstandigheden de tegelijke inzet van verwarming en ventilatie, zoals in Figuur 17 links, wat veel op minimum raam dan wel minimum pijp lijkt. Rechts in dezelfde Figuur is de flexibiliteit van de 'verdampingsregeling' te zien: niet alleen is het vochtiger, de setpoint wordt ook lager (het mag vochtiger worden) naarmate de straling toeneemt.



Figuur 17. Links: vochtregeling in de referentie afdeling. Een traditioneel regeling probeert de kas droger te houden dan de 'setpoint', wat is meestal ook droger overdag dan 's nachts. Middelen om dit te bereiken zijn ventileren en verwarmen, vaak ook tegelijk (van 6 tot 12 uur, in de afgebeelde dag). Rechts, vergelijking van dezelfde dag met de vochtregeling zoals resulteert uit de verdampingsregeling. De setpoint vochtdeficiet is lager overdag dan 's nachts en varieert met de instraling.

Zoals vergelijking (11) laat zien: bij een hogere luchtsnelheid (de grenslaag weerstand wordt kleiner) of meer blad-massa (LAI) kan dezelfde vermindering van de verdamping bereikt met een kleinere aanpassing van de dauwpuntdepressie. Dat is logisch: in deze omstandigheden is de bijdrage van zonnestraling aan de verdamping relatief klein, t.o.v. de bijdrage van luchtvochtigheid. Door rekening te houden met de zonnestraling en gewasomvang, en flexibel te zijn met betrekking tot luchttemperatuur, lijkt dit model tegemoet te komen aan de wensen voor een moderne vochtsturing. Door zijn eenvoud kan hij makkelijk geïmplementeerd worden in de huidige regelingen. Als aanpassing on line van de setpoints onmogelijk is, dan moet vergelijking (11) vertaald worden in een reeks IF ... THEN formules, waarbij het criterium een aantal klassen zonnestraling is. Bij gebrek aan een referentiekas, met bijbehorende dauwpuntdepressie, kan men uit gaan van de temperatuur en vochtigheid die een gangbare regeling zou opleveren.

Dauwpuntdepressie vs vochtdeficiet

In principe zijn alle indicatoren van vochtigheid even goed. Gekoppeld aan luchttemperatuur kan welke variabele dan ook (RV, vochtdeficiet, dampdruk...) vertaald worden in de andere. Regelen op de ene of op de andere maakt, in principe, niets uit. Hier is het dauwpunt naar boven komen drijven, in eerste instantie omdat het vertalen van alles in termen van temperatuur het beschrijven van de processen veel intuïtiever maakt. Als gevolg hiervan worden de vergelijkingen iets simpeler.

Het toepassen van dauwpuntdepressie als stuurvariabele voor de vochtregeling heeft een voordeel. Het is hier bewezen dat:

- regelen op dauwpuntdepressie overeenkomt met het regelen om condensatie op gewas(delen) te vermijden
- de verdamping te sturen is d.m.v. een simpele indicator gebaseerd op dauwpuntdepressie en straling

De twee 'handgrepen' waarmee een gewenste dauwpuntdepressie bereikt kan worden (luchttemperatuur en dauwpunt) komen vanzelfsprekend op hetzelfde 'regel'niveau. In het vorige paragraaf hebben we gezien dat de prioriteiten, door ons gesteld aan de verdampingsregeling, veel makkelijker te verklaren/implementeren zijn in een regeling die gebaseerd zou zijn op dauwpuntdepressie.

Toepasbaarheid bij andere kassen/gewassen

Omdat dit project proeven met tomaten betreft, in een vrij 'ouderwetse' kas, is het logisch om te kijken naar de toepasbaarheid van het resultaat in andere omstandigheden.

Door het werken met *relatieve* sturing van de verdamping is het belang van vele parameters (huidmondjesweerstand, b.v.) veel kleiner geworden. Een halvering van de verdamping wordt in eerste instantie bereikt door een halvering van de dauwpuntdepressie, voor alle gewassen én in alle kassen. Wat wel kan veranderen is de stralingsafhankelijke 'correctie' op deze richtlijn, vergelijking (11). De coëfficiënten van zonnestraling in die vergelijking zijn wel afhankelijk van:

1. de kas (lichttransmissie),
2. het gewas: LAI, absorptiecoëfficiënt en—in minder mate—grenslaagweerstand
3. systeem (het kan ook de grenslaagweerstand beïnvloeden)

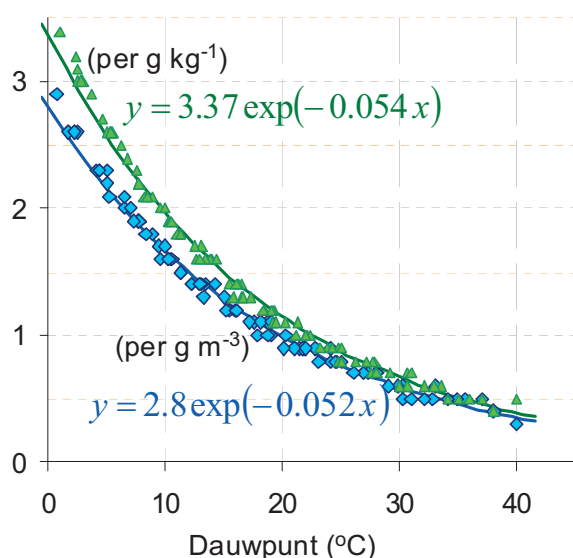
We nemen een voorbeeld: een paprika gewas met LAI = 6 en absorptie coëfficiënt 80% (Figuur 11); in een kas met doorlatendheid van 70%, met geforceerde luchtbeweging, waardoor de grenslaagweerstand 150 s/m wordt. De coëfficiënt van I_s in vergelijking (12) zou dan 0.0038 zijn, i.p.v. 0.0048.

In het algemeen, de verdamping van een omvangrijk gewas wordt relatief meer beïnvloed door de luchtomstandigheden dan door de straling, omdat elke blad wel meer toevoegt aan de oppervlakte voor convectie en verdamping, terwijl de stralingsabsorptie nauwelijks toeneemt. Het is verklaarbaar wat vergelijking (11) impliciet stelt, namelijk dat de verdamping van een dergelijk gewas makkelijker te sturen is door aanpassing van de dauwpuntdepressie dan bij een jong gewas waarvan elke blad in het zonlicht ligt.

Implementatie

Bij toepassing van bevochtigingssystemen, kan het interessant zijn om te weten wat het effect op het dauwpunt zou zijn van een verhoging/verlaging van de waterdamp concentratie met 1 g m^{-3} , dan wel 1 g/kg . Het is bijna vanzelfsprekend dat het effect van één gram waterdamp per kubieke meter het grootste is bij heel droge lucht (klein dauwpunt) en relatief klein bij vochtige lucht. Wat meer onverwacht kan zijn is dat de verhoging van het dauwpunt door de verhoging van de waterdampconcentratie met 1 g m^{-3} , onafhankelijk is van de temperatuur en RV, Figuur 18. Dit kan nuttig zijn bij de operatie van bevochtiging- dan wel ontvochtigingsinstallaties, zoals het volgende voorbeeld laat zien. In een kas met 19°C en 90% RV (dauwpunt 17.2°C , Tab. 2) meet een tuinder een gewastemperatuur van 18°C . Hij vindt dat dit kleine verschil een te groot gevaar oplevert van condensatie op gewas(delen), en zou graag het dauwpunt willen verlagen tot 16°C . Uit Figuur 17 is te lezen dat hij de waterdampconcentratie moet verlagen met ongeveer 1 g m^{-3} , wat betekent de RV verlagen tot ongeveer $84\% = (90\% \times 16.5 - 1)/16.5$.

Dauwpunt verandering ($^\circ\text{C}$)



Figuur 18. Verandering van het dauwpunt (Y-axis) als gevolg van een verhoging/verlaging van vochtinhoud van de lucht met 1 g m^{-3} (blauw) dan wel met 1 g kg^{-1} (groen), bij een gegeven dauwpunt (X-axis). De variatie in dauwpunt is berekend bij een groot aantal combinaties van luchttemperatuur (tussen 10 en 40°C) en RV's van 10 tot 100% (Tabel 2). De vergelijkingen zijn de respectievelijke best-fits. Bij voorbeeld: wil men een dauwpunt van 10°C verhogen, naar 15°C , dan moet de waterdampconcentratie toenemen met $5/1.7 =$ ongeveer 3 g m^{-3} . Dit kan b.v. in 32 s operatietijd van een bevochtigingsinstallatie van $2 \text{ l m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ in een volledig gesloten kas 6 m hoog.

In traditionele kassen een verlaging van de verdamping (en een grote energiebesparing) kan door deze simple aanpassingen bereikt worden:

- Vochtrekening overdag e/o bij belichting [bijna] loslaten
- Stooklijn lager
- Dode zone tussen stooklijn en ventilatie veel breder

Men moet wel bewust zijn van de omstandigheden waarbij de kans van condensatie op gewasdelen groot wordt. Om de kans klein te houden (en dus ook de benodigde veiligheid marge in de regeling), de volgende aandachtspunten in acht nemen:

- Luchtcirculatie verkleint de kans van condensatie, door het gewas op te warmen in zulke omstandigheden (niet altijd!)
- Verticale en horizontale gradiënten in dauwpunt zo klein mogelijk houden
- Houd rekening met de onontkombaar vertikaal temperatuurgradiënt in hoge gewassen
- Houd rekening met het najlen van zware gewasdelen (vruchten, stengels)

4.2 Nabeschouwing

Wat is hier aangetoond is dat om de verdamping met een vastgestelde fractie te verlagen is niet nodig om zijn waarde te weten, waardoor een verdampingsmodel wordt in deze overbodig. In feiten kon de berekening van de setpoints, zoals omschreven in Fig.2, vervangen worden door vergelijking (11).

Het had dus allemaal veel simpeler gekund bij onze experimenten! Dat was mijn eerste gedachte toen ik—na vele doodlopende wegen te hebben bewandeld—stuitte op vergelijking (11), die bevestigd werd door de oude metingen. Zonder enige twijfel kan ik dus zeggen door dit project wijzer te zijn geworden.

Ik ben ook dankbaar dat ik deze kans heb gekregen. In mijn achterhoofd heb ik altijd gehad, dat er een ‘simpeler’ weg moest zijn, en die moesten we vinden voordat een praktijksturing van de gewasverdamping denkbaar zou zijn. Daarnaast, ben ik best gelukkig dat de ‘simpeler’ weg op een zo elegante wijze blijkt te voldoen aan de eis dat de vochtsturing rekening zou houden met de variatie in klimaatfactoren.

Hoe verder? Het potentieel aan energiebesparing wordt pas waar gemaakt als deze sturing in de praktijk wordt gebruikt om met vertrouwen vochtiger te telen. Hiervoor zal het nodig zijn om het echt in een klimaatregeling te implementeren en daarna hem ook te gebruiken in een proef waarbij verschillende verdampingsstappen worden opgelegd om de grenzen van het fysiologisch mogelijk te zoeken.

5 Conclusie

De belangrijkste conclusies uit dit project zijn:

1. Hoewel alle vochtparameters verwisselbaar zijn, maakt het dauwpunt de zaken wel overzichtelijker
2. Sturen op een minimale verdamping komt overeen met het sturen op een minimale afstand tussen gewas temperatuur en dauwpunt
3. Een simpele formule is voorgesteld voor vochtsturing, gebaseerd op het sturen van de dauwpuntdepressie (verschil tussen luchttemperatuur en dauwpunt)
4. Sturing op dauwpuntdepressie is flexibel door de twee stuurknoppen: luchttemperatuur en dauwpunt (vochtigheid). Dit maakt het mogelijk steeds de meest energiezuinige oplossing te kiezen.
5. De resulterende 'vochtsetpoint' varieert met de omstandigheden, doordat de voorgestelde formule op een simpele wijze rekening houdt met klimaat factoren (straling, temperatuur en luchtsnelheid) en gewasomvang.
6. Hierdoor wordt een praktijkproef mogelijk waarbij wordt gezocht naar de fysiologische grenzen van gewasverdamping.

6 Literatuur

- Dueck, T., *et al.*, 2004.
Energie in kengetallen: op zoek naar een nieuwe balans. Plant Research Internationala, Wageningen, Nota 312: 104 pp.
- Eveleens, *et al.*, 2009.
Effecten van verneveling op groei en ontwikkeling van tomaat. Wageningen UR Glastuinbouw, Nota nr. : 45 pp.
- Körner Ch., J.A.Scheel & H. Bauer, 1979.
Maximum leaf diffusive conductance in vascular plants. *Photosynthetica* 13:45-82
- Li, Y.L., C. Stanghellini & H. Challa, 2001.
Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae*, 88:11-29
- Li, Y.L. & C. Stanghellini, 2001.
Analysis of the effect of EC and potential transpiration on vegetative growth of tomato. *Scientia Horticulturae*, 89:9-21
- Li, Y.L., C. Stanghellini & H. Challa, 2002.
Response of tomato plants to a step-change in root-zone salinity, under two different transpiration regimes. *Scientia Horticulturae*, 93: 267-279.
- Li, Y.L., L.F.M. Marcelis & C. Stanghellini, 2004.
Plant water relations as affected by osmotic potential of the nutrient solution and potential transpiration in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *The Journal of Horticultural science & Biotechnology*, 79(2): 211-218.
- Monteith, J.L., 1973.
Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, London: 241 pp.
- Stanghellini, C., 1987.
Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Ph.D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen, xvi+150 pp.
- Stanghellini, C., 1999.
Klimaatbeheersing kan EC-Schade bij tomaat beperken. *Groenten en Fruit/Glasgroenten*, 21 mei.
- Stanghellini, C. & W.Th.M. van Meurs, 1992.
Environmental control of greenhouse crop transpiration. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 51: 297-311.
- Stanghellini, C. & T. de Jong, 1995.
A model of humidity and its application in greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76: 129-148.
- Stanghellini, C., & F.L.K. Kempkes, 2002.
Energiebesparing door vochtintegrerende regeling, IMAG rapport P2002-73: 51 pp
- Stanghellini, C., C. Blok, M. Esmeijer & F.L.K. Kempkes, 2003.
Strategieverkenning verdamping, IMAG rapport P2003-2: 36 pp.
- Stanghellini, C., Kempkes, F.L.K. & E. Heuvelink, 2002.
Zonder drain dezelfde productie mogelijk. *Groenten & Fruit/glasgroenten*, 2002(43): 33 & 2002(48): 18.
- Stanghellini, C., & F.L.K. Kempkes, 2004.
Energiebesparing door verdampingsbeperking via klimaatregeling. *Agrotechnology & Food Innovations*, Rapport 309: 31 pp.

7 Kennisoverdracht

Omdat de potentiële energiebesparing pas bereikt wordt als de tuinders vochtiger gaan telen, is er veel aandacht besteed aan kennisoverdracht, voornamelijk het 'los koppelen' (in de telers' belevenis) van vochtdamping en productie. Het resultaat zal beschreven worden in een vakartikel.

Presentaties nationaal:

Werkgroep Synergie

16-09-08: Sturen van gewasverdamping: is het zinvol? is het mogelijk?

10-11-08: Verdamping en luchtvochtigheid: sturing en effecten in de praktijk

Workshop 'Vochtbeheersing bij het Nieuwe Telen'

Belijswijk, 25 Juni 2009:

1. Regelen van verdamping en regelen op verdamping
2. Vochtbeheersing bij het nieuwe telen: bottlenecks, kritische momenten en te volgen strategieën

Presentaties internationaal:

Workshop on 'Greenhouses in arid regions'

21-10-2008: Steering of fogging: control of humidity, temperature or transpiration?

Bilaterale Nederlands-Norwegen workshop

3-3-2009: 21-10-2008: Steering of fogging: control of humidity, temperature or transpiration?

Artikels vakpers:

Stanghellini, C.; Heuvelink, E., 2008. Op weg naar optimale sturing gewasverdamping Groenten + fruit, 33: 20-21.

Stanghellini, C.; Heuvelink, E., 2008. Sturing gewas temperatuur aan herziening toe Groenten + fruit, 34:18-19.

Stanghellini, C & Heuvelink, E. 2008. Op weg naar optimale sturing gewasverdamping. Vakblad voor de Bloemisterij, 63(49):32-33

Artikel international:

Stanghellini, C & F.L.K. Kempkes, 2008. Steering of fogging: control of humidity, temperature or transpiration? Acta Horticulturae, 797: 61-67

De handouts van de presentaties en de re-prints van de artikels zijn in Bijlage 2 opgenomen.

Bijlage I

Verdamping en dauwpunt

Hier berekenen we de afgeleide van de verdamping t.o.v. het dauwpunt, in het geval dat de uitwisseling van lang-golvige straling van het gewas met de omgeving verwaarloosbaar is, d.w.z. de stralingstemperatuur van de omgeving ongeveer gelijk is aan de gewastemperatuur.

Dan wordt de verdampingsformule:

$$LE = \frac{r_b R + 2LAI\rho C(T_{lucht} - T_{dauw})}{\frac{r_b + r_s}{\varepsilon} + r_b} \quad \text{W m}^{-2} \quad (I.1)$$

En de afgeleide:

$$\frac{dLE}{dT_{dauw}} = -\frac{2LAI\rho C}{\frac{r_b + r_s}{\varepsilon} + r_b} \Rightarrow dT_{dauw} = -\frac{\frac{r_b + r_s}{\varepsilon} + r_b}{2LAI\rho C} dLE \quad \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1} \quad (I.2)$$

Door vermenigvuldigen en delen door LE:

$$dT_{dauw} = -LE \frac{\frac{r_b + r_s}{\varepsilon} + r_b}{2LAI\rho C} \frac{dLE}{LE} = -\frac{r_b R + 2LAI\rho C(T_{lucht} - T_{dauw})}{\frac{r_b + r_s}{\varepsilon} + r_b} \frac{\frac{r_b + r_s}{\varepsilon} + r_b}{2LAI\rho C} \frac{dLE}{LE} \quad \text{K} \quad (I.3)$$

$$dT_{dauw} = -\frac{r_b R + 2LAI\rho C(T_{lucht} - T_{dauw})}{2LAI\rho C} \frac{dLE}{LE} = -\left[\frac{r_b R}{2LAI\rho C} + (T_{lucht} - T_{dauw}) \right] \frac{dLE}{LE} \quad \text{K} \quad (I.4)$$

Door expliciet schrijven de variatie in T_{dauw} , daarna rekening houden dat de variatie door ons gewenst in LE was - 35%, daarna toevoegen T_{lucht} zowel links als rechts:

$$T_{dauw,new} - T_{dauw} = -\left[\frac{r_b R}{2LAI\rho C} + (T_{lucht} - T_{dauw}) \right] \frac{dLE}{LE} \quad \text{K} \quad (I.5)$$

$$-T_{dauw,new} = -T_{dauw} + \left[\frac{r_b R}{2LAI\rho C} + (T_{lucht} - T_{dauw}) \right] (-0.35) \quad \text{K} \quad (I.6)$$

$$T_{lucht} - T_{dauw,new} = 0.65(T_{lucht} - T_{dauw}) - 0.35 \frac{r_b R}{2LAI\rho C} \quad \text{K} \quad (I.7)$$

De laatste vergelijking is het gewenste model voor de dauwpuntdepressie die de vereiste verlaging van de verdamping kan waarborgen (vergelijking (11) in de tekst.

Bijlage II

Hand-outs en reprints van alle presentaties en artikelen

Sturen van gewasverdamping: is het zinvol? is het mogelijk?	2-5
Verdamping en luchtvochtigheid: sturing en effecten in de praktijk	6-10
Steering of fogging: control of humidity, temperature or transpiration?	11-14
Steering of fogging: control of humidity, temperature or transpiration? (new version)	14-16
Op weg naar optimale sturing gewasverdamping	17
Sturing gewastemperatuur aan herziening toe	17
Steering of fogging: control of humidity, temperature or transpiration?	18-24
Regelen van verdamping en regelen op verdamping	25-27
Vochtbeheersing bij het nieuwe telen: bottlenecks, kritische momenten en te volgen strategieën	28-30

Sturen van gewasverdamping: is het zinvol? is het mogelijk?

Cecilia Stanghellini,
Wageningen UR Glastuinbouw
cecilia.stanghellini@wur.nl



WAGENINGEN UR

Inhoud

- Sturen van de verdamping: waarom?
- Het proces
- Wat kunnen we sturen en hoe
- Wat kunnen we verwachten

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini

Sturen van de gewasverdamping: waarom?

De gewasverdamping beïnvloedt:

- Vergewicht
- Door waterstress → productie (drogestof)
- Door condensatie → ziektes
- Opname van bepaalde nutriënten (m.n. Calcium)

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini

Wel minder verdamping – geen effect op productie

Nederland:

- 4 Experimenten met “verdampingsregeling” (tomaat)
 - Minder ventilatie
 - Minder stoken
 - Bevochtigen
- Laag verdamping = 65 % van referentie (dag EN nacht)
 - Vochtdeficit gemiddeld 0.24 kPa minder dan referentie
 - Temperatuur gemiddeld 1°C lager
- Productie gelijk

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini

Verneveling (voorkoming van stress)

Spanje

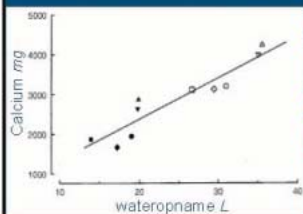
	Verdamping	Productie
Geen verneveling	100%	100%
Verneveling	68%	122%

- In Spaanse omstandigheden verneveling verhoogd productie
- Voornamelijk door grotere vruchten
 - Maar ook minder abortie
 - En meer drogestof

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini

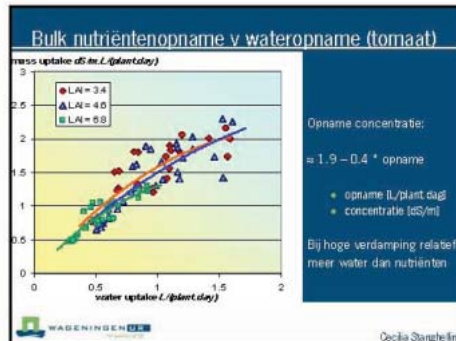
CA absorptie is evenredig met wateropname



- Punt type = tomat ras
- Open = laag EC
- Zwart = hoog EC
- Maar dit geldt niet voor ALLE nutriënten...

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini

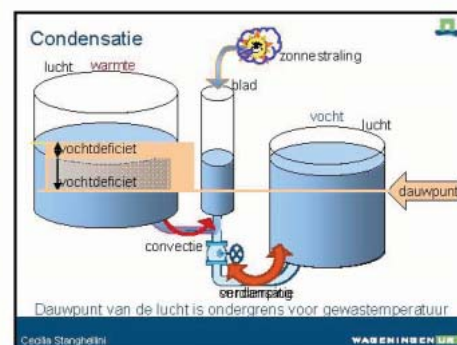
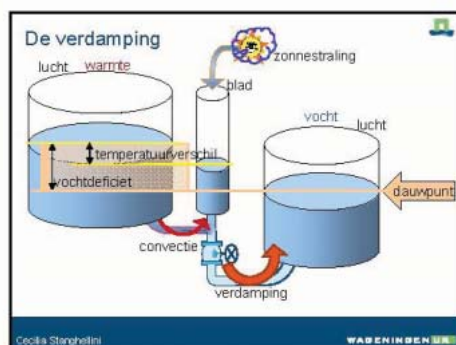
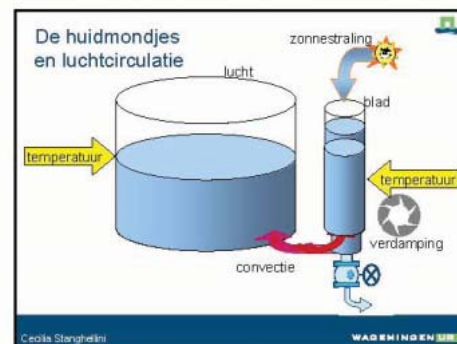
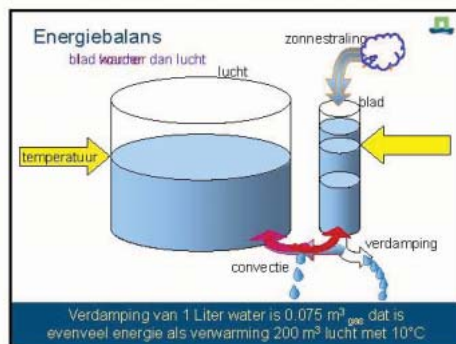


Inhoud

- Sturen van de verdamping: waarom?
- Het proces
- Wat kunnen we sturen en hoe
- Wat kunnen we verwachten

WAGeningen UR

Cecilia Stanghellini



Verdamping en condensatie zijn nauw verbonden

- Condensatie wordt door de omstandigheden bepaald
- Geen controle vanuit de plant (huidmondjes)
- Hoe dichter de planttemperatuur bij de dauwpunt van de lucht, hoe hoger de kans dat gewasdelen daaronder komen te staan
- Kans grootste op "zware" organen (bij opwarming)

WAGeningen UR Cecilia Stanghellini

Inhoud

- Sturen van de verdamping: waarom?
- Het proces
- Wat kunnen we sturen en hoe
- Wat kunnen we verwachten

WAGeningen UR Cecilia Stanghellini

■ De energietoevoer aan het gewas

- Belichten
- Schermen
- Verwarmen
- IR straling

■ De luchtcirculatie

- Ventilatie
- Condensatie
- Luchthandeling
- Bevochtiging

WAGeningen UR Cecilia Stanghellini

Lucht circulatie

- Verkleint **ALTIJD** het temperatuur verschil tussen het gewas en de lucht
 - Koelt als gewas is warmer dan de lucht
 - Verwarmt als het gewas is koeler dan de lucht
- Dus zeker gunstig bij gevaar van condensatie

WAGeningen UR Cecilia Stanghellini

Lucht circulatie en temperatuurgradiënten

- Temperatuur gradiënten verhogen de kans dat gewasdelen onder de dauwpunt komen te staan
- Door vereffening van de gradiënten maakt lucht circulatie kleinere veiligheidsmarges op vochtigheid mogelijk

WAGeningen UR Cecilia Stanghellini

Ventilatie

WAGeningen UR Cecilia Stanghellini

Energieverbruik

1 liter verdamping = $\pm 2,45$ MJ energie (latente warmte)

Afvoer:

Ventilatie

- 1 kuub lucht voert ~ 5 g waterdamp af...
- ... en ± 12 kJ negatieve warmte ($\sim 10^\circ\text{C}$ warmer dan buiten)
- Om 1 liter af te voeren moet ongeveer 200 kuub lucht geventileerd worden
- Dat is aan nog eens $2,4 \text{ MJ} = 0,15$ kuub gas

Vocht afvoeren in een energie efficiëntere wijze

WAGENINGEN UR
Cecilia Stanghellini



Inhoud

- Sturen van de verdamping: waarom?
- Het proces
- Wat kunnen we sturen en hoe
- Wat kunnen we verwachten

WAGENINGEN UR
Cecilia Stanghellini

Vochtiger telen

- Een lagere verdamping kan geen kwaad
 - Noch in winter → kan veel energie besparen
 - Noch in zomer → kan zelfs de productie verhogen
- Vochtiger telen, vochtiger telen en vochtiger telen
- In donkere omstandigheden risico voor condensatie
 - Luchtcirculatie
 - Condensatie op het dek bevorderen door vochtkier
 - Energie-efficiënt vocht afvoer (terugwinning van warmte)

WAGENINGEN UR
Cecilia Stanghellini

Bedankt ! vragen?

WAGENINGEN UR

Verdamping en luchtvochtigheid: sturing en effecten in de praktijk

Sjaak Bakker en Cecilia Stanghellini, Wageningen UR Glastuinbouw
sjaak.bakker@wur.nl, cecilia.stanghellini@wur.nl



WAGENINGEN UR

Verdamping/ luchtvochtigheid en groei

- Gemiddeld wordt 90% van opgenomen water door de plant weer verdampt
- 10% van water voor groei (gewas en evt vruchten)



WAGENINGEN UR

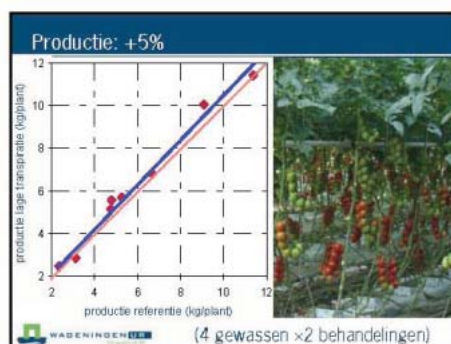
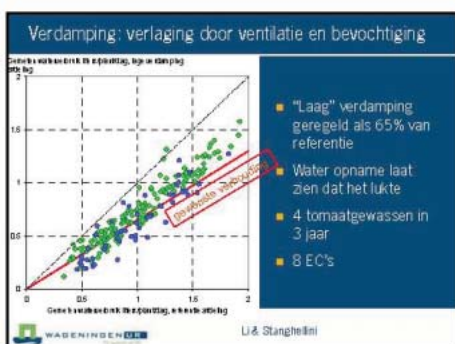


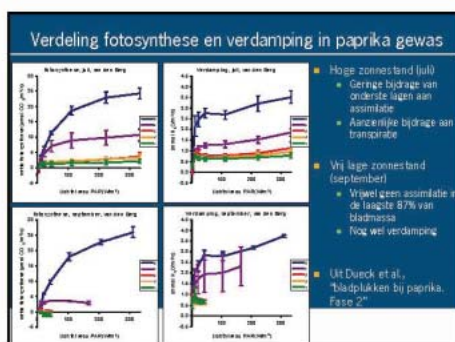
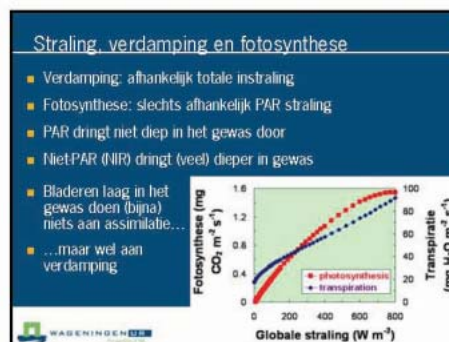
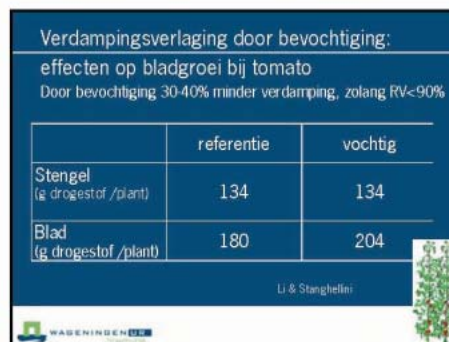
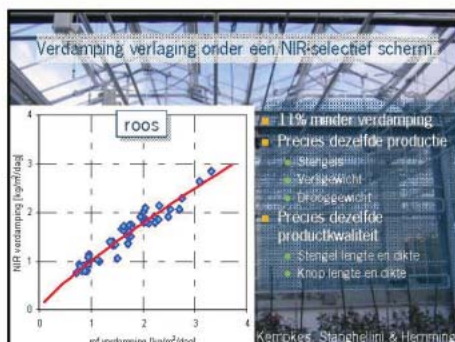
Verdamping: knoppen om aan te draaien

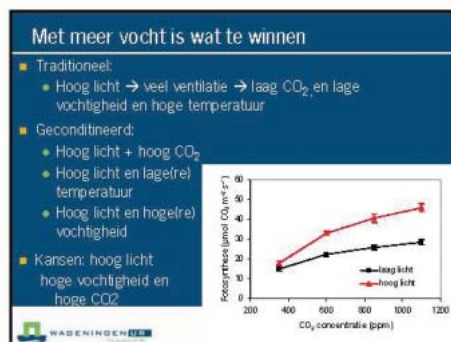
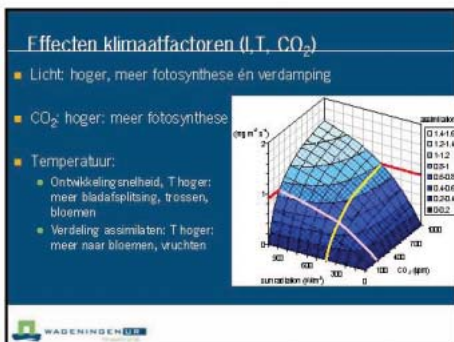
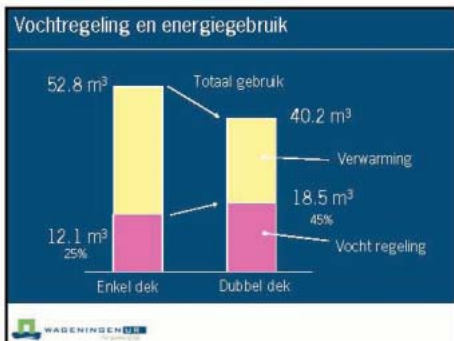
- Ventilatie
- Bevochtiging
- (NIR) Schermen



WAGENINGEN UR







Effecten hoge luchtvochtigheden (winterperiode)

- Vochtdeficiet 6 of 1.5 g/m³ (24 uren gemiddelde)

Tomaat	6 g/m ³	1.5 g/m ³ (vochtig)
Vochtdeficiet		
Vroege prod.(kg/m ²)	2.6	3.0
totale prod.(kg/m ²)	10.7	9.3


Vochtig → houdbaarheid 0-20% korter

- Koninkommer:
 - hogere productie bij hogere RV, maar korter houdbaar



Gewasrespons Kas

Huisman
hogere vochtigheid en
meer licht in zomer



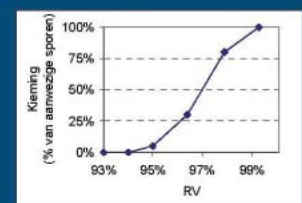
	lengte (cm)	Verskil referentie (%)	Verskil in Blad oppervlak	Verskil in vers gewicht
Areca	77	33	34	56
Anthurium sierra	36	0	39	46
Anthurium silence	38	-25	4	14
Croton red batik	57	100	59	95
Croton sunny star	64	50	149	168

Conclusies Vochtiger telen

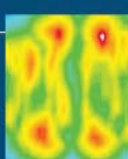
- Een lagere verdamping kan geen kwaad
 - Niet in de winter → kan veel energie besparen
 - Niet in de zomer → kan zelfs de productie verhogen
- Risico's ?
 - Ziekten
 - Plantkwaliteit: mogelijk zwakkere plant ?
 - Kwaliteit (smaak, scheuren, houdbaarheid)
 - Werkklimaat voor medewerkers
 - Legionella?

Hoge luchtvochtigheid → meer kans op ziekten?

Bijvoorbeeld Botrytis bij hoge luchtvochtigheid



Probleem: temperatuurverschillen



- Temperatuurverschillen leiden tot:
 - Verschillen in productie, kwaliteit
 - Toename lokale ziekterisico's (dauwpunt)
- Acties (algemeen)
 - Hogere temperatuur setpoints
 - Geringere marges voor temperatuur integratie
 - Lagere setpoints luchtvochtigheid
- Overall effect: hoger energie gebruik, lagere efficiëntie

Luchtcirculatie en temperatuurgradienten



- Temperatuur gradienten verhogen de kans dat gewasdelen onder het dauwpunt komen
- Vereffening van de gradienten door luchtcirculatie maakt kleinere veiligheidsmarges op vochtigheid mogelijk

Luchtcirculatie

- Verkleint ALTIJD het temperatuur verschil tussen het gewas en de lucht
 - Koelt als gewas is warmer dan de lucht
 - Verwarmt als het gewas is koeler dan de lucht
- Dus zeker gunstig bij gevaar van condensatie



WAGENINGEN UR

Luchtbeweging (recirculatie)

- Vermindering temperatuur verschillen
- Geen merkbaar effect op fotosynthese
- Geen effect op verdamping
- Geen morfologisch effect (plantvorm en opbouw)



WAGENINGEN UR

Eind conclusies

- Plant kan veel meer hebben dan we standaard aannemen:
- Vochtiger telen biedt kansen in de winter:
 - energiebesparing
- maar met name in de zomer:
 - gunstig voor groeien productie
- Negatieve effecten van luchtvochtigheid vooral bij:
 - hoge vochtdeficiet $> 7.5 \text{ g/m}^3$
 - lage vochtigheden $< 1.5 \text{ g/m}^3$
- Risico op natslaan wordt verkleind door voldoende luchtbeweging:
 - doordat lucht en bladtemperatuur dichterbij elkaar komen te liggen

WAGENINGEN UR

Steering of fogging: control of humidity, temperature or transpiration?

Cecilia Stanghellini & Frank Kempkes
WageningenUR Greenhouse Horticulture
cecilia.stanghellini@wur.nl



WAGENINGEN UR

Background

- Tendency to ventilate as little as possible
- Fog cooling, usually triggered by VPD
- Wish for more inclusive steering concepts
 - Fresh weight
 - Water stress
 - Chance of condensation
 - Uptake of nutrients
 - Blossom-End Rot
- Fresh look at an old experiment


All related to/affected by crop transpiration

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini

Experimental set-up

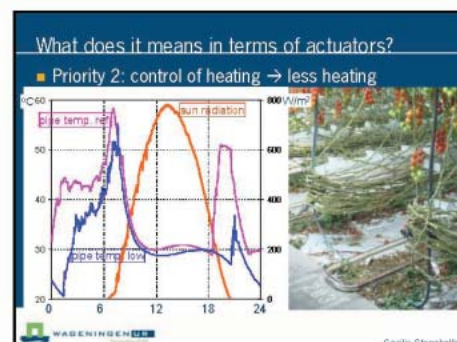
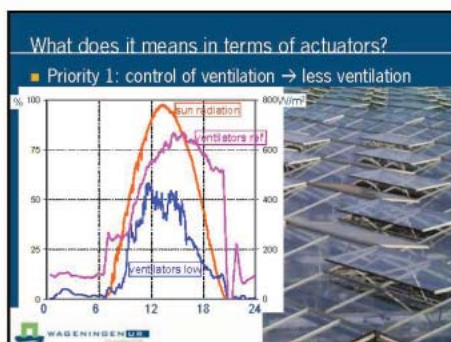
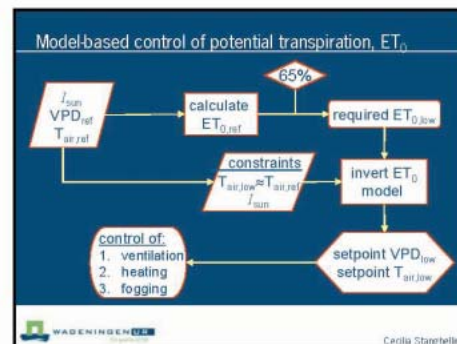
Hypothesis: low transpiration mitigates effect of high EC

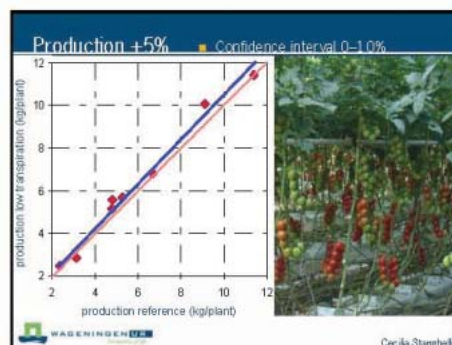
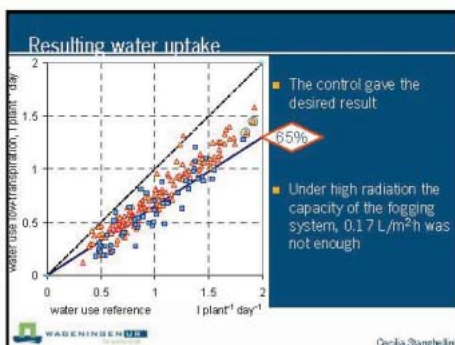
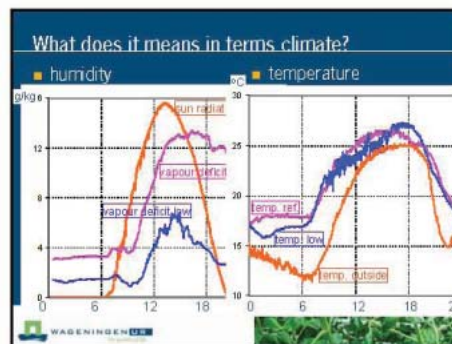
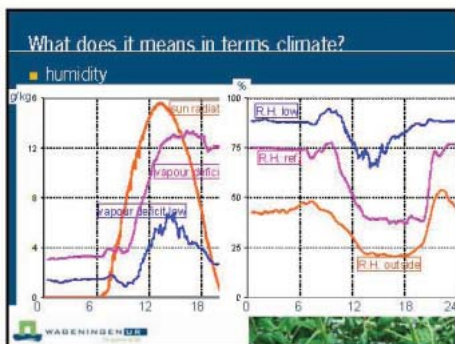
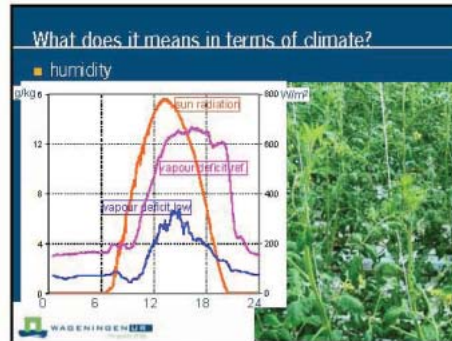
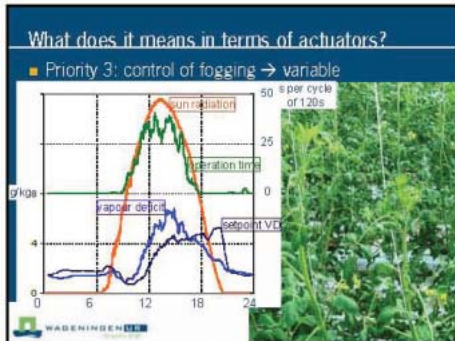


- 4 tomato crops
- 13 weeks
- Published in Li Yafeng et al., 2001, 2003, 2008, 2004

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini






Conclusions

- A lower transpiration than we are used
 - does not lower production
 - allows for less ventilation
 - may result in quite some energy saving
- Potential transpiration as steering parameter:
 - accounts for radiation, humidity and temperature
 - delivers variable setpoints with wheather conditions
- Comparison with other fog steering strategies
 - may be worthwhile



Steering of fogging: control of humidity, temperature or transpiration?

Cecilia Stanghellini & Frank Kempkes
WageningenUR Greenhouse Horticulture
cecilia.stanghellini@wur.nl



WAGENINGEN UR

Background

- Tendency to ventilate as little as possible
- Fog cooling, usually triggered by VPD
- Wish for more inclusive steering concepts
 - Fresh weight
 - Water stress
 - Chance of condensation
 - Uptake of nutrients
 - Blossom End Rot
- Fresh look at an old experiment

All related to/affected by crop transpiration

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini


Experimental set-up

Hypothesis: low transpiration mitigates effect of high EC

reference transpiration

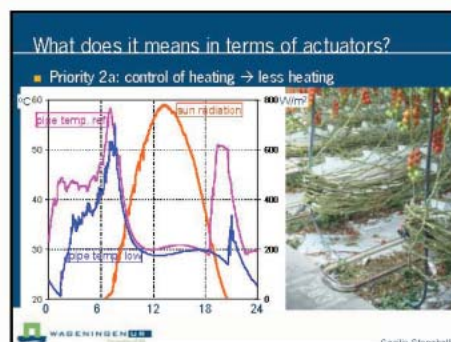
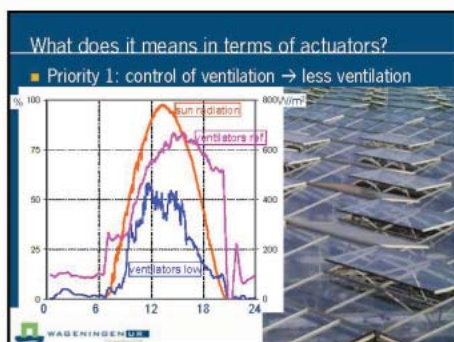
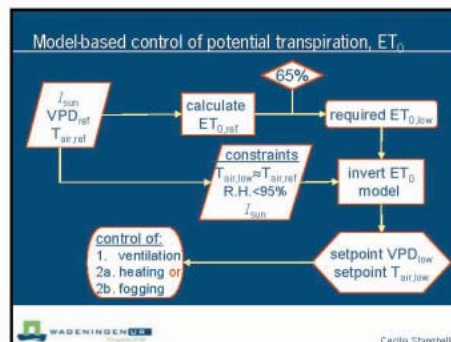
reference EC high EC ref. EC high EC

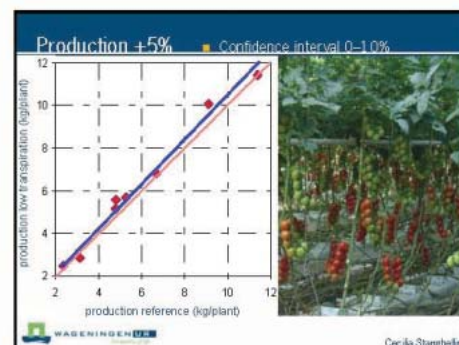
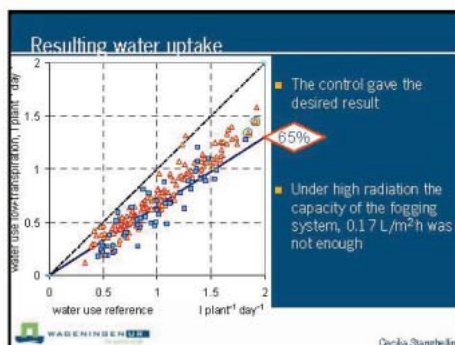
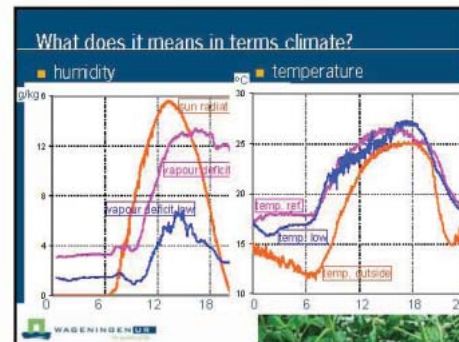
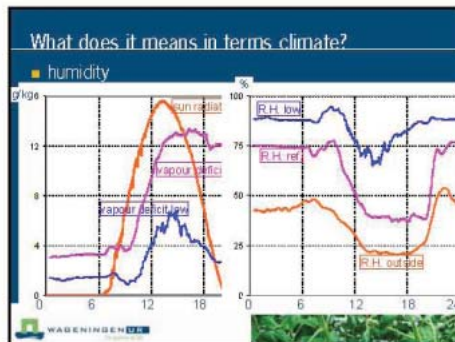
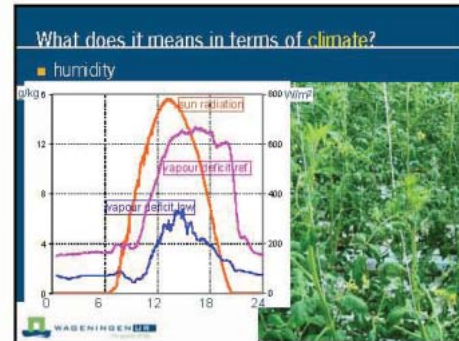
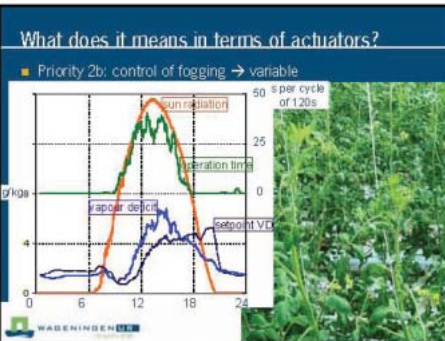
4 tomato crops
3 years
Published in:
Li Y.L. et al.
• 2001
• 2002
• 2004

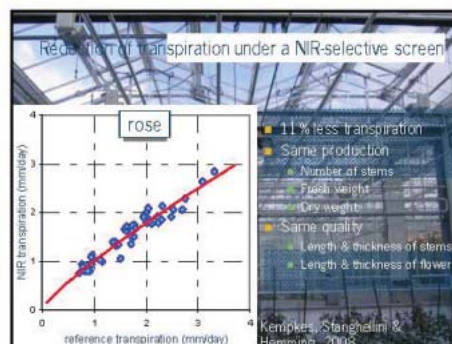


WAGENINGEN UR

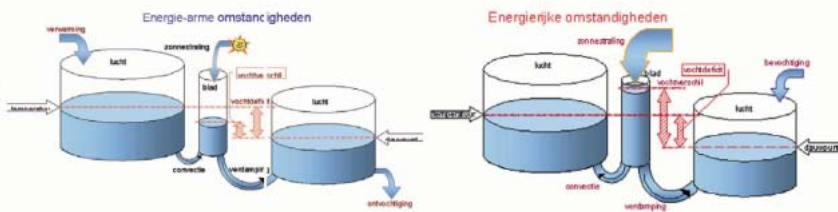
Cecilia Stanghellini







DOOR CECILIA STANGHELLINI EN EP HEUVELINK
Waarinnen LH Glastuinbouw



De verdampingsregeling

Figuren: de verdamping bij energie-arme (links) en energie-rijke (rechts) verstuifde dihydroden. In de eerste situatie worden minimumbelasting (verhoging van het niveau links) en minimum luchtdrukking (verhoging van het niveau rechts) gebruikt om de verdamping te verhogen.

[illegible]

VERDAMPING STUREN Het is niet alleen voor geneeskundigen een factor zijn omvee belangrijk in het beheersen van de temperatuur. Zo zorgt de zogeheten thermische feedback er voor dat de verdamping (veel) minder dan evoemdig verandert met kleine 'biedtellen' de gresdagsverandering en de huidige medische stand. Het gaat ongeveer als volgt: wordt het voor een blad moeilijker om te verdampen, dan wordt het blad warmer, waardoor het temperatuurverschil met het daupoint gruter wordt en dus de verdamping weer toeneemt. In traditionele kassen zijn dus de stuurmechanismen voor de verdamping zeer beperkt. Het komt neer op de biotemperatuur van verhoging - de kassen beregenen - en verwarmling van de daupoint van de kassen. Het is niet alleen de verdamping die de temperatuur van de kassen en minimum raam door, zal nermend verhoging. Omdat ventilatie ook warmte uit de lucht haalt, is het echter desoeken met

[illegible]

Figure 1 (boven) en 2 (de convectie (waterdruk)) is afhankelijk van de temperatuur van het bad

De temperatuur van een gewas hangt af van veel factoren. Een plant ontvangt niet alleen energie, maar geeft die ook af, tot er evenwicht ontstaat. Dat proces wordt gestuurd via de huidmondjes, maar ook een teler heeft mogelijkheden om de gewas temperatuur te sturen.

DOOR CECILIA STANCHELLINI EN EP HELMELINK
Wageningen UR, Glutaminebouw

De energiebalans van een plant is een heel nuttig begrip voor de klimaatregeling. Het wil zeggen dat alle plantdelen evenveel energie teruggeven aan de omgeving als ze ontvangen. De planttemperatuur waarborgt dit evenwicht. Deze energiebalans is te vergelijken met het niveau van een vloeistof in een kuip met een instroom- en een uitstroomgaatje. Via het instroomgat stijgt het vloeistofniveau (tegenwoordig) in de kuip. Daardoor neemt de druk toe en stroomt vloeistof weg via het uitstroomgatje, tot evenwicht in de kuip ontstaan is. Het bepaald niveau. Wrokt de instroom, dan stijgt het vloeistofniveau in de kuip naar een nieuw evenwichtsniveau. Anderom daalt door verhoging van het uitstroomgatje het evenwichtsniveau. Deze denkbeelden over evenwicht toepassen op de opname en afgifte van energie door bladeren in een kas betekent dat een telar dan niet de drie energiebronnen rekening moet houden: straling, convection en verdamping.

STRALING, CONVECTIE EN VERDAMPING

Een zo'n zonnig dag neemt aan blad de temperatuur aan waar evenveel energie via verdamper (latente warmte) en convector (rodebare warmte) samen wordt afgegeven als het blad aan zonnestraling heeft opgenomen. Gewassen verdampen echter ook 's nachts, terwijl dan geen zonnestraling wordt opgenomen. Dat komt omdat de uitwisseling van energie via convector tweerichtingverkeer is. Wanneer een blad warmer is dan de omringende lucht, geeft het energie af aan de omringende lucht, maar is het blad kouder, dan onttrekt het energie aan de lucht. Dit is te verklaren met de theorie van de tweede wet van de thermodynamica.

is met een andere, veel grotere tank met een vast vloeistofniveau (omgeving in de kad.). Als het niveau van de vloeistof in de kuip hoger is dan in de tank (figuur 1), stroomt vloeistof uit de kuip naar de tank. Zodra het niveau in de kuip onder het niveau in de tank komt (figuur 2), stroomt vloeistof in de kuip (= energie in het blad) omléef start de gewas-temperatuur.

TEMPERATUUR VERMOGEN
 Wil een tuinder de gewas temperatuur beïnvloeden, dan kan dat via de luchttemperatuur, met de temperatuurregeling. Daarnaast biedt verhoging of verlaging van de stralingsopname via belichting, schaduwen of krijten mogelijkheden om de gewas temperatuur te sturen. Luchtcirculatie (verlagen van de grenslaagweerstand) ten slotte zorgt voor vergroting van het debiet van de 'convectieplij'.

Het gewas kan het debiet van de 'verdampingspijp' zelf zuren, van de huimdraden. Als de huimdraden goed gekleefd zijn, leidt dit tot een kleiner debiet en stijgt de bladtemperatuur. In het blad warmen dan de draden, dan wordt de afgevoerde droogte convectie gort. Het gewas kan het debiet van de 'verdampingspijp' zelf zuren, van de huimdraden. Als de huimdraden goed gekleefd zijn, leidt dit tot een kleiner debiet en stijgt de bladtemperatuur. In het blad warmen dan de draden, dan wordt de afgevoerde droogte convectie gort. Het gewas kan het debiet van de 'verdampingspijp' zelf zuren, van de huimdraden. Als de huimdraden goed gekleefd zijn, leidt dit tot een kleiner debiet en stijgt de bladtemperatuur. In het blad warmen dan de draden, dan wordt de afgevoerde droogte convectie gort.

watervapoorconcentratie of het specifieke vochtgehalte, maar de relatieve vochtigheid (hr) is zeker geen goede maat hiervoor. Als de damptemperatuur hoger is dan het dauwpunt van de lucht, zijn verdamping plaats. Hoeveel verdamping precies, hangt af van de humiditeits- en de damptemperatuur onder het dauwpunt komt, leeg de stroom van waterdamp om in verdampende plaats. Dit brengt energie de laterste warmte naar het blad. Er geldt daarbij wel een beperking in opname, omdat de verdamping niet kan optreden als de vochtigheid van de teeltnutrienten gelijk of lager is dan het dauwpunt. Berootheid, dat wil omvochtigen komt overeen met het dauwpunt respectievelijk verhogen en verlagen. Voort 'weg ventileren' is gelijk aan ontvochtigen, maar heeft ook een indirect effect op de luchttemperatuur, wat zeker de zuurbalans van het vochtpeil vermindert.

WIAT MET SEKEREN

Bi volledige zonnepanelen is een blad warmer dan de lucht en wordt de stralingsenergie tegengegeven aan de omgeving, zodat de temperatuur van de verduiding stijgt. Bij indirecte zwing (of geen zonnepanelen) moet een deel (of het geheel) van de energie voor de verduiding komen uit andere warmtebronnen en moet het blad koeler dan de lucht zijn.

De dampuitgang van de lucht is de ondergrens voor de bladtemperatuur. Zuurzaden dienen in een heel klein blad te hanteen, zijn luchttemperatuur, straling, luchtcoëfficiënt en dampuitgang (vochthoudend) van de lucht. Dit geldt trouwens voor alle plantengroepen. Het enig verschil is dat het zwaar gewasden langer duur voordat de planttemperatuur het evenwicht heeft bereikt. Met deze wetgeving moet rekening worden gehouden. Met andere woorden, bij een veranderend klimaat kan de temperatuur blijvend onder de dampuitgang komen, met consequenties als: gavel, ook al is de evenwichtstemperatuur in de plant hoger.

HOOG OFGAAND GEWAS IN SEMI-GESLOTEN KAS
In een diep gewas is altijd sprake van een verloop aan stroling. Bladeren en gewasdelen onderin ontvangen minder licht en dus ook minder energie dan bladeren bovenaan. Deze bladeren en gewasdelen zijn dus koeler dan de rest van de plant. In een traditionele kas is meestal sprake van een omgekeerd verloop van de vochttoestand van de lucht (dauwcurve). De bron van waterdamp

immers het gewas en de afvoer vindt plaats bij het dak (condensatie of ventilatie).

Samen zijn dit twee goede redenen waarom de verdamping van
bladeren heel sterk afneemt van boven naar beneden in een diep
gewas. Dat heeft een convergerend effect op de temperatuur-
gradient. Die gradient is kleiner dan je zou kunnen verwachten
alleen op basis van de stralingsafname. Het ordent met de
verwarming versterkt dit, omdat daarmee ook een tegengesteld
verloop in de luchttemperatuur wordt gecreëerd.
In vijf of zes nieuwe concepten wordt bij hoge intrinsieke kosten
de afname van de verdamping gepubliceerd. Dit zou de nog twee
redenen voor een sterk afhankende temperatuurgradient van boven
naar beneden in het gewas. Andersom is - om dezelfde reden -
het verloop in de verdamping waarschijnlijk minder sterk dan in
een traditionele kas.

De fysiologische kennis van een gewas is zeker (nog) niet toereikend om een uitdruk te kunnen doen over de mogelijke gevolgen van deze veranderende gradienten voor de productie. Wel is ook nu al duidelijk dat efficiënt gebruik van nieuwe stuurmogelijkheden in moderne kasuien vraagt om een herevaluatie van de bestaande denkbeelden over luchttemperatuur- en vochtregeling. Daarbij staat de energiebalans op blad-, gewas- en kasniveau centraal. ■

Temperatuur en vochtigheid

In de huidige lessen valt daniek lichttheoretische begrippen en lichtbeoefening veel meer te stroom dan voorheen. Lichttheorie en optica worden nu in een breed scala afzonderlijk te noemen, wat in traditionele lessen niet kan. Huiden 200 het groen optisch lenzen worden gestuurd en het om de spiegel productiviteit naar de 100 km lenzen handmatig. Het feit dat deze unit niet is toegankelijk, toont slechts de wettelijke velden in de les van geografische kennis en andere delen van de grenzen van de toepassing van traditionele 'stroomopbouw' in nieuwere systemen, in dit artikel gaat het om de grens-temperatuur: welke mogelijkheden heeft een leraar om de te beoefenen en wat zijn de grenzen van de student, in een gebied artikel van de toepassing control.

Steering of Fogging: Control of Humidity, Temperature or Transpiration?

C. Stanghellini and F. Kempkes
Wageningen UR Greenhouse Horticulture
Wageningen
The Netherlands

Keywords: semi-closed greenhouse, ventilation, water use, plant water relations

Abstract

Fogging systems are increasingly used to cool greenhouses and prevent water stress. More recently, fogging systems are applied also in relatively low radiation environments (such as The Netherlands), for a better control of product quality than whitewashing and to reduce need for natural ventilation – thus allowing for higher CO₂ concentrations to be maintained in the greenhouse. Most commonly the steering of such systems is done by setting an upper limit to the deficit of specific humidity that, whenever exceeded, triggers the fogging system. In both cases, however, one may wonder whether static and pre-fixed set points are the most effective choice.

In the experiment presented in this paper, fogging and venting were controlled with the purpose of steering crop transpiration. The desired transpiration rate was the input of an algorithm that calculated on-line the required humidity and air temperature set points in view of the current weather factors. The set points were then the input of a standard P-controller that calculated vent opening and time of operation of the fogging system. In this paper, the resulting climate and actuator control operations are discussed and compared with a similar greenhouse controlled in a traditional fashion. The study concluded that a desired crop transpiration rate (an all-round indicator of crop well-being) could be used to select dynamic set points for the climate control in a greenhouse equipped with a fogging system.

INTRODUCTION

The management of humidity has two purposes: maintaining crop transpiration within boundaries and preventing condensation on the crop. With respect to transpiration: too low and too high rates may result in local Ca deficiencies; in addition, a high rate – not matched by water uptake – results in turgor loss, partial stomatal closure and loss of assimilation. Condensation is known to increase incidence of pathologies such as mildew and botrytis (Köhl et al., 2007). In a traditional greenhouse both aims are combined in set-points for humidity (a maximum relative humidity or a minimum humidity deficit) whose crossing triggers procedures combining ventilation and heating, estimated to result in some 20% of the energy consumption of Dutch greenhouse (Bakker, 1991). There is little that can be done in a traditional greenhouse about too high transpiration, except shading or whitewashing, which obviously lower assimilation.

Fogging systems are a very effective tool to prevent water stress. Most commonly the steering of such systems is done by setting an upper limit to a measure of the deficit of humidity that, whenever exceeded, triggers the fogging system. The underlying assumption is that the deficit of humidity is a good indicator of potential evaporation, and limiting the deficit is equivalent to limit crop transpiration. It is known, however, that the same deficit of humidity can result in quite different potential evaporations, depending on other climate factors, particularly solar radiation, so that one may wonder whether static, pre-fixed set points are the most effective choice. Since they have become relatively cheap, high-pressure fogging systems are applied also in fairly low radiation environments (such as The Netherlands), for a better control of product quality than whitewashing and to reduce need for natural ventilation, thus allowing for higher CO₂ concentrations to be maintained in the greenhouse. The so-called semi-conditioned greenhouses (venting, heating, fogging and cooling, sometimes coupled to thermal

storage) make it possible to control independently the temperature and humidity, which is not possible in more traditional greenhouses.

In the lack of a relevant body of knowledge, growers apply the steering criteria and set points they know. In view of the need of applying water resources in the most effective way possible and as the productivity in such greenhouses has not grown so as to pay back the additional investment that is required, there is an increasing awareness that such advanced systems should aim at the direct control of growth related processes and be based on simple indicators of plant welfare (Dieleman, 2008). This, together with the increasing energy prices, has spawned the need in particular for a fresh look at humidity, the purpose(s) of controlling it and to which extent our knowledge about its effect in plant processes has been conditioned by the constraints to its management in a natural system.

In this perspective, this study had a “fresh look” at data obtained from a series of experiments that was performed to test the hypothesis that lowering the transpiration rate could mitigate the yield loss caused by high salinity. This was proven and has been reported extensively (Li and Stanghellini, 2001; Li et al., 2001, 2002, 2004) and has been implicitly confirmed by Romero Aranda et al. (2002). Central to the experiment was a “transpiration control”, an algorithm that constantly maintained crop transpiration to 65% of the rate in an identical compartment, using the opening of the roof ventilators and fogging as sole actuators. This paper describes how this was implemented and discusses the results in terms of climate attained and control of actuators, in order to show how a desired crop transpiration rate (an all-round indicator of crop well-being) could be used to select dynamic set points for the climate control.

MATERIALS AND METHODS

The experiments were performed in two identical compartments (300 m² each) of a multi-span Venlo glasshouse (Wageningen, the Netherlands, 52° N), where round tomato crops were grown in rock-wool, with a plant density of 2.2 m⁻² and grown according to standard Dutch cultural practice. The greenhouses were equipped with a hot-water heating system and natural ventilation through alternate zenith opening on both sides of the ridge. One of the two compartments (the low-transpiration one, LT) was equipped with a high-pressure fogging system, with a constant capacity 0.17 L m⁻² h⁻¹. The experiments were designed as split-plots, the subplots (half of each compartment) being the salinity treatment. So, there were two re-circulating nutrient solutions, each supplied to two halves of a compartment. A drain fraction around 70% and continuous recirculation for two hours after 2 a.m. were meant to prevent accumulation of salts in the slabs, which was indeed avoided. The transpiration control algorithm was implemented in the greenhouse climate control system and performed at two-minute intervals, 24 hours a day with the following procedure:

1. Reference transpiration rate was calculated through the model of Stanghellini (1987) – as implemented by Stanghellini and Van Meurs (1992) – as a function of current solar radiation (or lack thereof, at night), humidity and temperature in the reference compartment (high transpiration, HT) and an estimated Leaf Area Index (LAI). Solar radiation available for the crop was estimated from the weather station data, through the measured mean transmittance of the compartment.
2. The same model was inverted, to calculate the combinations of specific humidity deficit and temperature that would yield a transpiration rate which is 65% of the reference, under the same solar radiation (or lack thereof) and LAI.
3. Among those combinations, the one was selected that least modified the air temperature (with respect to the reference), under the constraint that the relative humidity, R.H., would not exceed 95%. The selection criterion was in view of the well known effects of temperature on crop growth and development and the constraint on R.H. aimed at eschewing mould pathologies (which never appeared).
4. A proportional (P) controller aimed first at attaining the desired humidity deficit through the control of the ventilators. When this was not enough, then it calculated the required operation time of the fogging system.

5. If necessary, the heating system was activated by a P-controller, as in the reference compartment.

To prevent differences in potential assimilation, CO₂ concentration in the LT compartment was made to be equal to the other one, which was controlled to 700 and 400 ppm, with closed and open vents, respectively. All climate and actuators data were logged by the greenhouse climate control system and saved at two-minute intervals. Transpiration was monitored by the following means: 8 plants on trays, supported by a frame resting on electronic weighing balances (60 kg full scale, 0.1 g nominal accuracy) one in the reference compartment and one in each salinity treatment in the low-transpiration compartment. Irrigation flow to each subplot was monitored through pulse flow meters with an accuracy of 0.5 litres. Drain of all subplots was collected separately in small tanks hence it was pumped back – through flow meters of the same kind – into the corresponding irrigation tank, by pumps triggered by floaters. For additional checks, a drain gauge (tipping spoon) measured drain flow, EC and pH from 8 plants in each subplot. In addition, the water use for refilling the two nutrient solution tanks (compound water use of the two equal salinity treatments in the two compartments) was metered as well. With hindsight, so many cross checks were not unnecessarily cautious, since all methods were rather prone to failure. The weighing balances could not be fully trusted while the fogging was on, and the two hours of continuous recirculation (and other incidents) caused leakages in some instances.

RESULTS AND DISCUSSION

Nevertheless, enough valid water use and transpiration data were collected to support the conclusion that the transpiration control achieved what it was meant to do (Fig. 1). As shown by Li et al. (2001), no effect was ever observed on the dry matter production or on plant development. There was a trend of more fresh weight production in the low transpiration compartment, that progressed from small and non-significant at EC = 2 dS m⁻¹ to large and highly significant at EC = 9 dS m⁻¹.

How the “transpiration control” translated in terms of actuators is shown in Figure 2, displaying climate and actuator data during a sunny day. In the HT compartment, the humidity control caused a combination of minimal venting (C) and heating (D) in the hours before sunrise, whereas in the LT compartment vents were open more shortly and heating was applied for a shorter time and to a lower pipe temperature. The ventilation was much less during the whole day (C), though dynamic set points for temperature and deficit of humidity resulted in more variability in ventilation. A higher air temperature was allowed in the morning and afternoon (D) in the LT compartment. The steering of the fogging (A) was more variable than it would be if it were solely based on one variable, such as humidity or radiation (C). The capacity of the system was too limited to deliver the desired humidity (B) in such a sunny day, in spite of the almost continuous operation between noon and 5 p.m., which explains why the measured transpiration was slightly higher than the desired level (Fig. 1). The daily daytime and night-time average climate in the two greenhouses, for two experiments lasting nearly a whole year, is displayed in Figure 3. We may infer that the same productivity was attained in spite of significant differences in humidity management (mean humidity difference 1.3 g/kg) and, to a lower extent, temperature (mean difference 1.5 and 0.8°C for the 1st and 2nd experiment, respectively).

CONCLUSION

The use of a complex indicator of plant well-being, such as the potential transpiration, allows for dynamic set points for climate actuators to be derived. This may reduce energy costs for humidity control and it may also reduce the need for ventilation (making possible increased CO₂ concentrations).

ACKNOWLEDGEMENTS

This “fresh look at old data” has been made possible by a joint grant of the Dutch

Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality and the Dutch Horticultural Board (PT proj. 13235).

Literature Cited

- Bakker, J.C. 1991. Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables. PhD Dissertation, Wageningen University p.155.
- Dieleman, A. 2008. Effecten van luchtvochtigheid op groei en ontwikkeling van tomaat. Wageningen UR Greenhouse Horticulture, Report 519:28.
- Köhl, J., de Visser, P.H.B. and Wubben, J. 2007. Risico's op schimmelaantasting in vruchtgroenten. Wageningen UR Greenhouse Horticulture, Report 467:41.
- Li, Y.L., Stanghellini, C. and Challa, H. 2001. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae* 88:11–29.
- Li, Y.L. and Stanghellini, C. 2001. Analysis of the effect of EC and potential transpiration on vegetative growth of tomato. *Scientia Horticulturae* 89:9–21.
- Li, Y.L., Stanghellini, C. and Challa, H. 2002. Response of tomato plants to a step-change in root-zone salinity, under two different transpiration regimes. *Scientia Horticulturae* 93:267–279.
- Li, Y.L., Marcelis, L.F.M. and Stanghellini, C. 2004. Plant water relations as affected by osmotic potential of the nutrient solution and potential transpiration in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *The J. of Horticultural Science and Biotechnology* 79(2):211–218.
- Romero-Aranda, Soria, R.T., and Cuartero, J. 2002. Greenhouse mist improves yield of tomato plants grown under saline conditions. *J. of the American Society of Horticultural Science* 127:644–648.
- Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Ph.D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen. p.150.
- Stanghellini, C. and van Meurs, W.T.M. 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. *J. of Agricultural Engineering Research* 51:297–311.

Figures

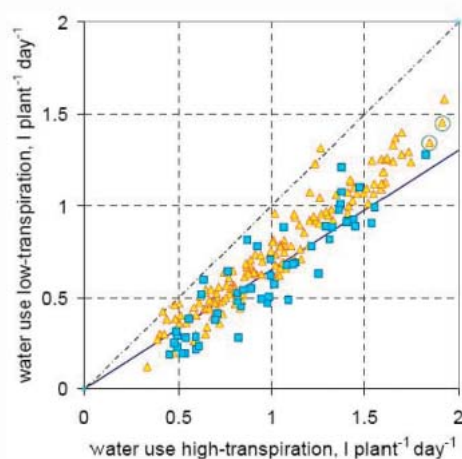


Fig. 1. Water use (liters per plant per day) measured in the low-transpiration compartment v water use of the same EC treatment, measured in the reference, years 1996 and 1997. Squares indicate a root zone salinity of 2 dS m⁻¹ and triangles of 9 dS m⁻¹, two different experiments. The thick line indicates the target trend of the transpiration controller. The two circled triangles refer to the day discussed in Figure 2.

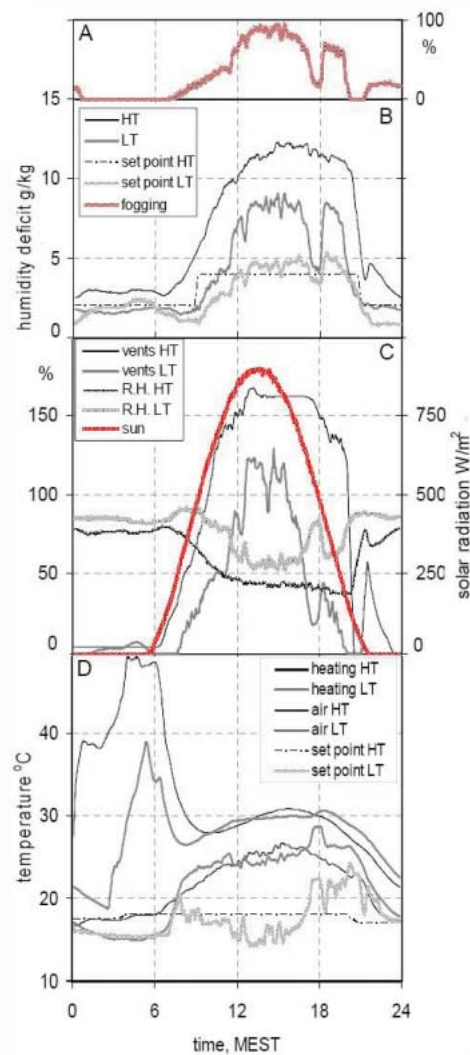


Fig. 2. Set points, actuators and climate in the two compartments (HT = high and LT = low transpiration, respectively), June 3rd, 1997, a sunny day. A) operation of the fogging system, % of time, at least 16 seconds without operation were left each 2-min cycle; B) measured specific humidity deficit and its "set point". Set point in HT is minimum, in LT is used for P-control of venting and/or duration of fogging; C) solar radiation, relative humidity and vents opening, sum of both sides in % of the maximum opening; D) temperatures: "heating" is pipe temperature; "air" is measured, the set point in HT is the heating set point for air temperature, in LT it is used for P-control of both heating and ventilation.

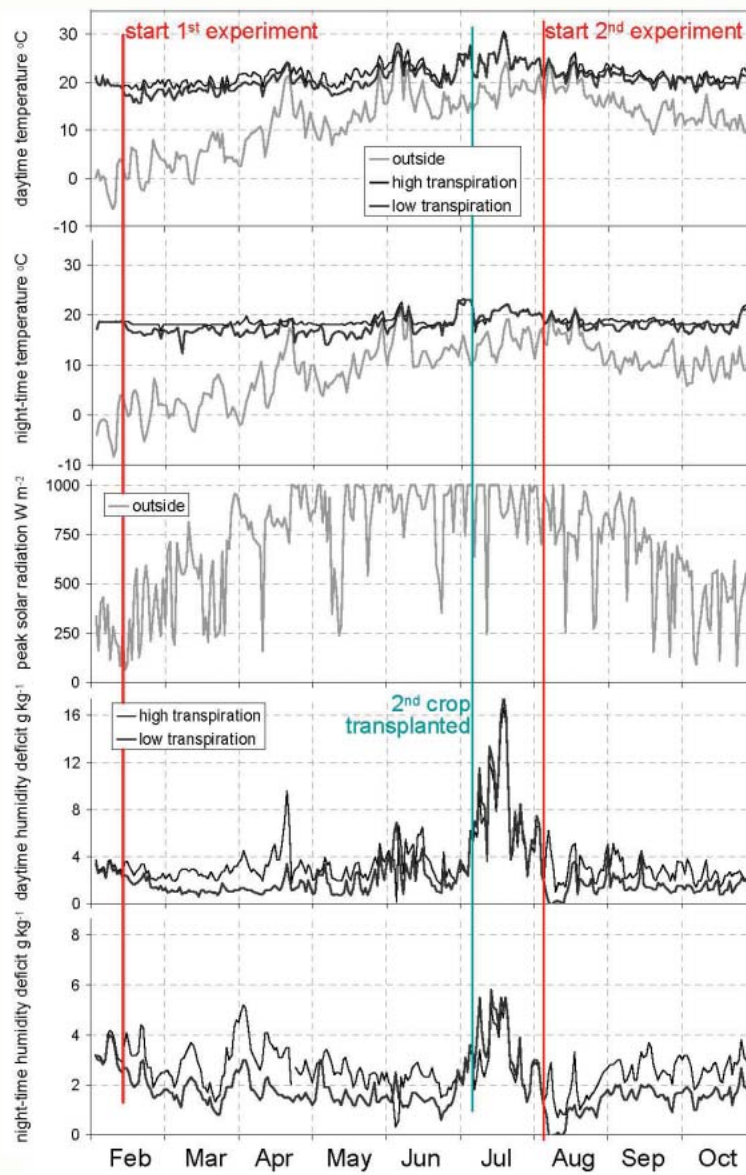


Fig. 3. Average ambient climate data in the two greenhouses, for two subsequent crops, 1996. The first crop had been transplanted on Dec. 15th, 1995. The peaks in humidity deficit in July are due to the coincidence of sunny weather and a very young crop.

Regelen van verdamping en regelen op verdamping

Cecilia Stanghellini,
WageningenUR Glastuinbouw
cecilia.stanghellini@wur.nl



WAGENINGEN UR

Voorgeschiedenis

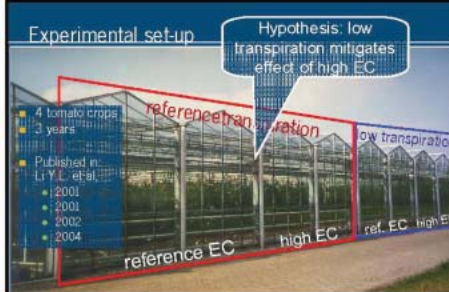
- Planten kunnen doen met [50%] minder verdamping
 - Uitspraak uit een "vochtworkshop" 2 jaar geleden
- Bestaande data-set van "verdampingsregeling"
 - onderzoek op interactie wateropname & salinity

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini

Experimental set-up

Hypothesis: low transpiration mitigates effect of high EC



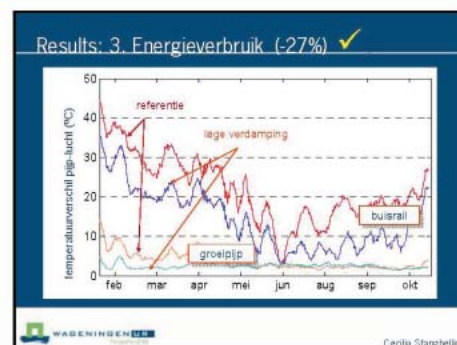
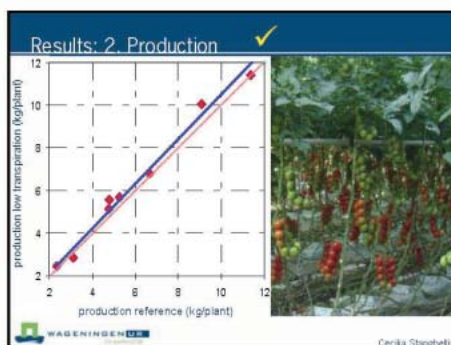
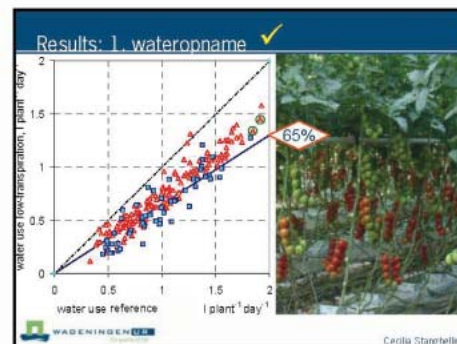
4 tomato crops
3 years
Published in:
Li-Y. L. et al.
• 2001
• 2002
• 2004

reference EC high EC ref. EC high EC

reference transpiration low transpiration

WAGENINGEN UR

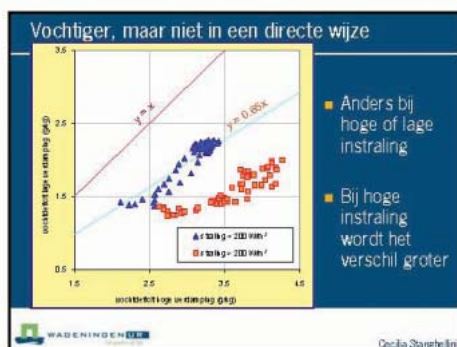
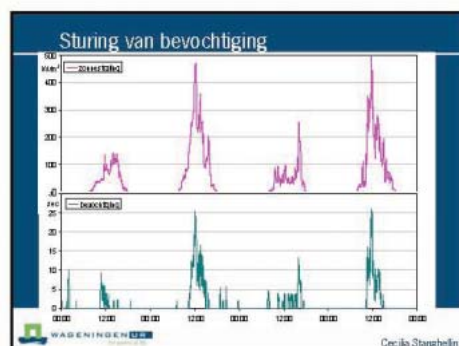
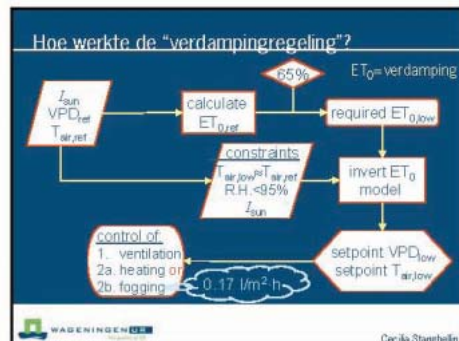
Cecilia Stanghellini



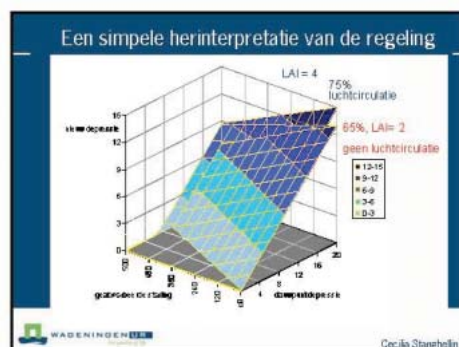
Doorstelling van huidige project

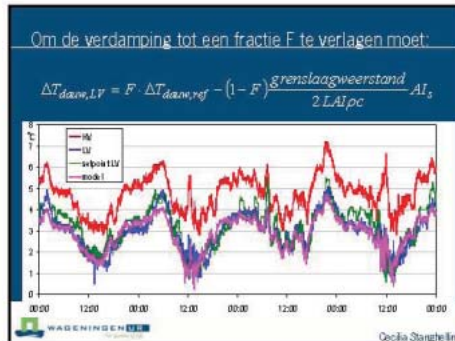
- Evaluatie van data mbt klimaatactuatoren
- Analyse van de stuurbaarheid van de verdamping
- Richtlijnen tbv van huidige regeling & nieuwe telen

WAGeningen UR
Cecilia Stanghellini



- Anders bij hoge of lage instraling
- Bij hoge instraling wordt het verschil groter





Conclusies

- De gewasverdamping mag [veel] lager zijn
- Dit kan heel veel energie besparen
- Vochtdeficit dan wel dauwpuntdepressie omlaag
- Nog lager (vochtiger) naar mate de straling
 - De "stralingscorrectie" kan kleiner zijn bij:
 - Veel blad
 - Luchtcirculatie

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini



Vochtbeheersing bij het nieuwe telen: bottlenecks, kritische momenten en te volgen strategieën

Cecilia Stanghellini,
Wageningen UR Glastuinbouw
cecilia.stanghellini@wur.nl



WAGENINGEN UR

Het nieuwe telen

- Wens om zo min mogelijk te ventileren
- Aanwezigheid van bevochtiging e/o LBK e/o luchtcirculatie
- Behoeftte aan algemenere sturingsconcepten gebaseerd op:
 - Vers gewicht
 - Nutrientopname
 - Water tekort
 - Kans op schimmelziektes
 - Kwaliteit

allemaal gerelateerd naar/
beïnvloed door
gewasverdamming

WAGENINGEN UR

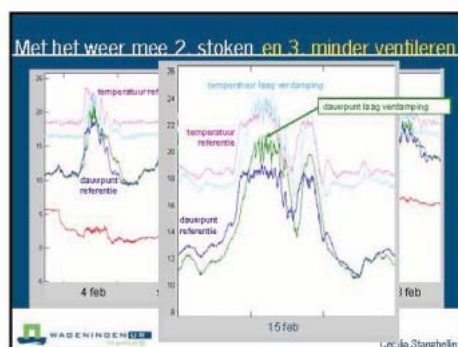
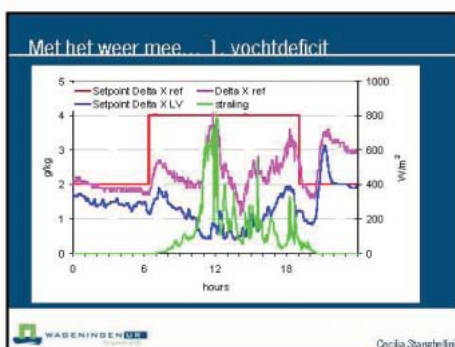
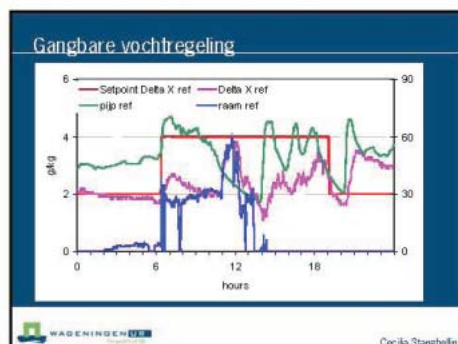
Cecilia Stanghellini

Inhoud

- Vochtiger telen, wat houdt het in?
- Waar moeten we op letten?
- Wanneer zijn we de sturing kwijt?
- Conclusies

WAGENINGEN UR

Cecilia Stanghellini



Wat houdt het in?

- Vochtregeling overdag e/o bij belichting [bijna] loslaten
- Stooklijn lager
- Dode zone tussen stooklijn en ventilatie veel breder

Waar wel op letten?



Cecilia Stanghellini



Condensatie en verdamping

- Verdamping evenredig met temperatuur verschil gewas-dauwpunt
- Risico van condensatie omgekeerd evenredig met temperatuur verschil gewas-dauwpunt
- Condensatie vermijden = vermijden van [te] lage verdamping



Cecilia Stanghellini

Condensatie vermijden

- Temperatuurverschil gewas-dauwpunt niet te klein
- Gewastemperatuur ↑
 - Schermen
 - Belichten
 - Verwarmen
- Dauwpunt ↓
 - Energie-efficiënt vocht afvoer
 - Koeling



Cecilia Stanghellini

Horizontale en verticale variaties



- Horizontale en verticale distributie van dauwpunt
 - Hogere homogeniteit = kleiner "veiligheidsmarge"
- Variatie in gewastemperatuur
 - Stralingsprofiel
 - Warmtecapaciteit van gewasdelen



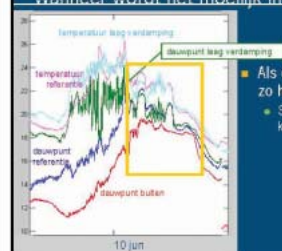
Cecilia Stanghellini

Lucht circulatie

- Verkleint ALTUD het temperatuurverschil tussen het gewas en de lucht
 - Koelt als gewas warmer is dan de lucht
 - Verwarmt als het gewas koeler is dan de lucht
- Dus zeker gunstig bij gevaar van condensatie



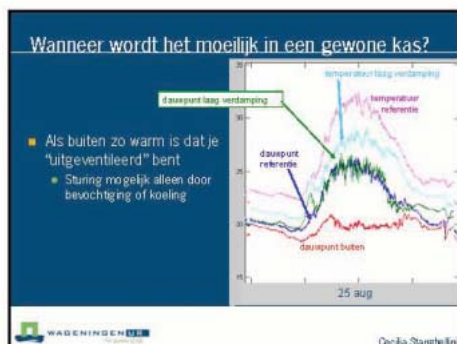
Wanneer wordt het moeilijk in een gewone kas?



- Als de dauwpunt buiten bijna zo hoog is als binnen...
 - Sturing mogelijk alleen door koeling bij gesloten ramen



Cecilia Stanghellini



Conclusies

- Flexibeler met het weer meegaan
 - Koeler/warmer en vochtiger laten worden
- Condensatie vermijden
 - Dauwpunt horizontaal/verticaal homogeen
 - Rekening houden met verschillen in het gewas
 - Luchtcirculatie
 - Schermen
 - Zo nodig energie-efficiënt vochtafvoer
 - Belichten & koelen ook hiervoor inzetten
- Verneveling e/o LBK zo nodig inzetten

WAGENINGEN UR
Cecilia Stanghellini

